

**BASES PARA EL DISEÑO DE UN PROTOTIPO DETECTOR A PARTIR DE LOS
MATERIALES SEMICONDUCTORES OPTIMOS PARA LA DETECCIÓN DE
RADIACIÓN IONIZANTE EN EL RANGO DE ENERGIA DE LOS RAYOS X (eV- KeV).**

**Carolina Cortés Bermúdez
Johan Arcesio Marín Giraldo**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Físico**

**Director:
Juan Pablo Trujillo Lemus**



**Universidad
Tecnológica
de Pereira**

**Universidad Tecnológica de Pereira
Programa de Ingeniería Física
Pereira, Colombia
2020**

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por haberme apoyado durante estos años y no haber dejado de creer en mí, a mi novia por estar a mi lado sin importar las circunstancias y por brindarme su apoyo incondicional todos estos años y a nuestro director Juan Pablo Trujillo por su apoyo y su confianza depositada en nosotros en este proyecto.

Johan Marín Giraldo

Agradezco a Dios por haberme dado esta gran oportunidad, a mi familia, especialmente a mi madre Libia Bermúdez, por apoyarme en cada decisión y tenerme tanta paciencia y confianza, a mi compañero de tesis quien luchó a mi lado para culminar este proyecto de grado satisfactoriamente, además de ser mi apoyo y gran motivación, también agradezco a nuestro director Juan Pablo Trujillo por su ayuda, dedicación y por la confianza que depositó en nosotros para finalizar el proyecto.

Carolina Cortés Bermúdez

Contenido

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA.....	8
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVOS	10
1. MARCO TEÓRICO	11
1.1 Radiación electromagnética	11
1.2 Semiconductores	13
1.3 Radiación electromagnética ionizante	15
1.3.1 Efectos biológicos de la radiación ionizante.....	16
1.4 Espectro electromagnético	19
1.4.1 Rango del espectro	19
1.4.2 Rayos X.....	25
1.4.3 ¿Cómo se producen los rayos X?	27
1.5 Detectores de rayos x a partir de semiconductores	30
1.5.1 Funcionamiento de los detectores de radiación X a partir de semiconductores	30
1.5.2 ¿Por qué semiconductores?.....	36
1.6 Generación de carga por radiación.....	37
2. ESTADO DEL ARTE	38
3. METODOLOGÍA	39
4. MATERIALES PARA LA DETECCIÓN DE RADICACIÓN	40
4.1 Grupo IV y IV-IV Materiales	40
4.1.1 Semiconductores elementales.....	41
4.2 Materiales del grupo III – V	43

4.2.1	Materiales de brecha estrecha.....	46
4.3	Materiales del grupo II – VI.....	47
4.4	Materiales del grupo III – VI.....	51
4.5	Materiales del grupo n-VII.....	52
4.6	Compuestos ternarios.....	54
4.7	Elección del material semiconductor óptimo para la detección de rayos X	57
4.7.1	Requisitos generales sobre el material del detector	57
5.	DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES PARA LA DETECCIÓN DE RADIACIÓN	
	59	
5.1	Fotodiodo de avalancha	59
5.2	Fotodiodo de Schotky	61
5.3	Fotodiodo PIN	62
5.4	Sensores de microbanda.....	64
5.5	Dispositivos acoplados por carga	65
5.6	Sensor de Píxel Activo (APS)	67
5.7	Detectores MOSFET (Transistor de efecto de campo metal -óxido- semiconductor).68	
6.	ALGUNAS VENTAJAS DE LOS DETECTORES SEMICONDUCTORES.....	69
7.	DISEÑO DEL PROTOTIPO ELECTRÓNICO DEL DETECTOR DE RAYOS X	70
7.1	Diagrama esquemático	70
7.1.1	Sensor.....	71
7.1.2	Preamplificador	72
7.1.3	Moldeador de pulso	73
7.1.4	Digitalizador.....	74
7.2	Diseño	75
7.2.1	Cables coaxiales	76

7.3	Elección del detector de semiconductores	77
7.3.1	Diodo PIN	77
7.4	Electrónica para la función de lectura.....	79
7.4.1	Medición de la carga.....	79
7.4.2	Amplificador sensible a la carga	79
7.4.3	Ruido en un amplificador sensible a la carga.....	80
7.4.4	Filtrado y conformación.....	80
7.5	Ruido	81
7.5.1	Ruido térmico, Johnson o de voltaje.....	82
7.5.2	Ruido dieléctrico.....	82
7.5.3	Ruido 1/f.....	82
7.5.4	Microfonía	82
7.5.5	Corriente de fuga	83
7.6	Microcontrolador	83
7.6.1	Conexión del microcontrolador con la pantalla LCD	84
7.7	Fuente de alimentación	85
7.8	Montaje teórico del circuito	86
8.	DISEÑO DE UN PROTOTIPO MECÁNICO DEL DETECTOR DE RAYOS X	87
8.1	Materiales y medidas	87
8.2	Diseño mecánico.....	88
9.	CONCLUSIONES	91
10.	TRABAJOS FUTUROS	92
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	93

RESUMEN

Se revisan los requisitos básicos sobre materiales semiconductores para la detección y análisis de los rayos X, debido a que los semiconductores compuestos abarcan un rango tan amplio de propiedades físicas que técnicamente es posible diseñar un material para cualquier aplicación, se realizará la comparación entre las diferentes propiedades que estos posean con respecto a la resolución de energía, la eficiencia de detección de rayos X, una expectativa de vida mayor, entre otras propiedades importantes que se mencionaran más adelante, eligiendo así el semiconductor óptimo para la detección de este tipo de radiación.

Como el modo de funcionamiento del detector depende no solo del material adoptado y de la arquitectura elegida, sino también del método de detección, el documento revisa los diversos principios de detección y las características operativas del detector, incluido la elección del material. Mostrando además el proceso de la realización de un diseño de un detector de radiación de rayos X, abarcando el proceso de la electrónica utilizada y el diseño mecánico.

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos semiconductores se utilizan ampliamente como detectores de radiación en una gran variedad de campos, como física nuclear, física de partículas elementales, óptica, astronomía de rayos X, medicina, pruebas de materiales, etc. Desde que en 1949 detectara por primera vez partículas (mediante un semiconductor de germanio hasta la actualidad, se han desarrollado múltiples materiales semiconductores, siendo los más empleados en la fabricación de sensores de radiación nuclear por ionización: el silicio (Si), el germanio (Ge), el arseniuro de galio (GaAs), la familia del telurio de cadmio (CdTe y $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$) y el yoduro de mercurio (I_2Hg). Como el potencial de los distintos semiconductores para la detección de radiación nuclear viene determinado por su número atómico, banda prohibida o "bandgap", energía de ionización, movilidad, vida media de los portadores generados y resistividad, el documento revisa los diversos tipos de radiación, los principios de detección, las características operativas del detector de semiconductores y las estructuras de los dispositivos semiconductores. A pesar de la gran importancia de procesar la señal detectada, solo se hace una breve mención de las técnicas electrónicas utilizadas, haciendo hincapié en los dispositivos de detección en sí mismos.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA

Los equipos generadores de radiación ionizante han aumentado en los últimos años, lo que ha permitido el desarrollo de una gran variedad de dispositivos para la detección de las radiaciones nucleares, los más habituales son las cámaras de ionización, los contadores Geiger-Müller, contadores proporcionales, de centelleo, y los sensores semiconductores, el empleo de sensores semiconductores en la detección de la radiación nuclear ha aumentado últimamente, esto ha sido posible debido al desarrollo de nuevos materiales y estructuras que han permitido disponer de sensores de mayor resolución energética, de respuesta más rápida y una expectativa de vida mayor, a diferencia de los contadores antes mencionados que son más grandes y obsoletos comparados con las ventajas que ofrece un detector a partir de semiconductores.

En Colombia no hay una empresa que se dedique a fabricar este tipo de detector, y tampoco una que fabrique los materiales necesarios para el sensor de radiación, por lo que su costo aumenta debido a que tienen que ser importados, haciendo que las instituciones donde se trabaja con radiaciones ionizantes tengan que acudir al uso de detectores con menor tecnología volviéndose un problema de seguridad debido a los altos riesgos de la exposición prolongada a radiaciones ionizantes por parte de profesionales y usuarios de estas instituciones.

Por último, vemos que en el país hay una deficiencia en la investigación de nuevos materiales para los detectores semiconductores, ya que toda la información encontrada fue realizada por centros de investigación de otros países, en parte porque se necesita de una tecnología y unas técnicas especializadas para la fabricación de estos materiales utilizados para los detectores, que requieren de unas buenas instalaciones.

Debido al incremento de estos nuevos materiales, el uso de la tecnología y conocimientos ya existentes es posible diseñar un prototipo que detecte la radiación ionizante de los rayos X. Con base en los planteamientos anteriores se propone la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar un prototipo que detecte la radiación de rayos X a partir del uso de materiales semiconductores óptimos?

JUSTIFICACIÓN

Las radiaciones ionizantes pueden ser un importante factor de riesgo para la salud humana por lo que es un tema de gran interés social, y esto toma aún más relevancia después de la promulgación de la resolución 482 de 2018 la cual reglamenta tanto el uso de equipos generadores de radiación ionizante como su control de calidad en prácticas médicas, veterinarias, industriales o de investigación a través del otorgamiento de licencia para el ejercicio de dichas prácticas, en Colombia no se vigila con la rigurosidad que merece el cumplimiento de dicha resolución, tanto por el uso de dispositivos obsoletos de detección como también por el desconocimiento de las personas sobre los protocolos de protección radiológica. Los detectores de radiación a partir de semiconductores son más compactos y fiables que los detectores gaseosos por lo que son más útiles a la hora de usar y transportar cuando se efectúan prácticas que involucren radiación ionizante. En Colombia son pocas las instituciones que cuentan con la licencia expedida por el ministerio de salud y protección social para este tipo de dispositivos, creando una gran desventaja de seguridad radiológica con instituciones europeas y norteamericanas que ya han implementado con éxito el uso de los detectores de los diferentes tipos de radiación ionizante a partir de los materiales semiconductores. Este proyecto está apoyando al grupo de investigación BIOIF (Ingeniería Biomédica y Ciencias Forenses), para evolucionar y obtener experiencia en el área de las mediciones de radiación ionizante.

El proyecto planteado tiene gran importancia debido a que a partir de él podría salir un prototipo de origen local, comúnmente estos equipos deben ser importados, por lo que disminuiría costos y además ayudaría a actualizar los equipos usados en el país, ya que en Colombia algunas instituciones aun usan equipos anticuados mientras que en los países desarrollados cada vez más se usan detectores basados en semiconductores.

OBJETIVOS

Objetivo general

Proponer las bases para diseñar un prototipo que detecte la radiación en el rango de energía de los rayos X a partir de materiales semiconductores ideales para ello.

Objetivos específicos

- Analizar qué tipo de semiconductor es óptimo para la detección de la radiación de rayos X a temperatura ambiente.
- Proponer un diseño electrónico con los requerimientos necesarios de un prototipo detector de rayos X.
- Proponer un diseño mecánico 3D de un prototipo detector de rayos X.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Radiación electromagnética

La electricidad y el magnetismo al principio se pensó que eran fuerzas separadas. Sin embargo, en 1873, el físico escocés James Clerk Maxwell desarrolló una teoría unificada del electromagnetismo. El estudio del electromagnetismo trata de cómo las partículas cargadas eléctricamente interactúan entre sí y con los campos magnéticos. Hay cuatro interacciones electromagnéticas principales, para las cuales Maxwell desarrollo un conjunto de fórmulas, llamadas ecuaciones de Maxwell.

Las cuatro interacciones electromagnéticas principales son:

- La fuerza de atracción o repulsión entre las cargas eléctricas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.
- Los polos magnéticos vienen en pares que se atraen y repelen entre sí, al igual que las cargas eléctricas.
- Una corriente eléctrica en un cable produce un campo magnético cuya dirección depende de la dirección de la corriente.
- Un campo eléctrico en movimiento produce un campo magnético, y viceversa.

Las ondas electromagnéticas tienen las vibraciones perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, por tal motivo, se las clasifica entre las ondas transversales. Estas ondas, además, viajan a través del espacio, y no necesitan de un medio material para propagarse.

El físico alemán Heinrich Hertz, en 1888, realizó los primeros experimentos para detectar físicamente las ondas electromagnéticas. Él fue el primero que construyó un aparato que emitía y detectaba ondas electromagnéticas VHF y UHF. [1]

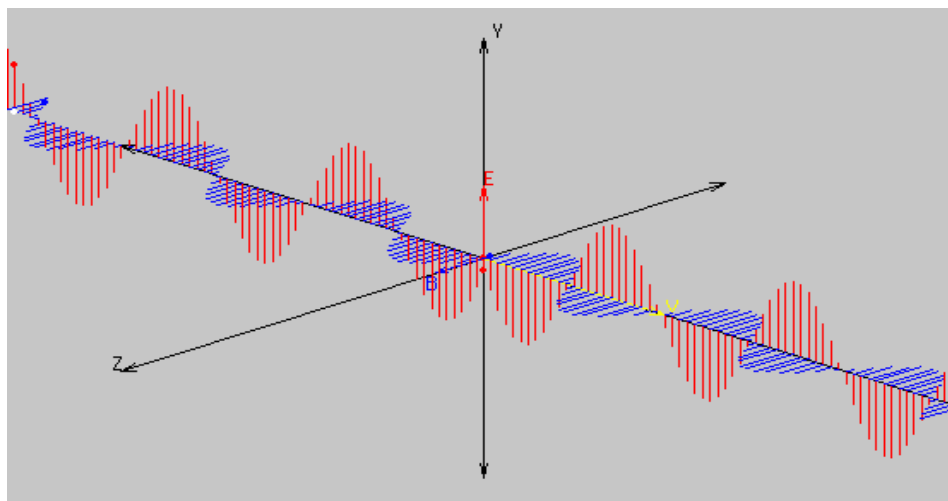


Figura 1. Vibración del campo eléctrico y magnético

Recuperado: <https://astrojem.com/radiacionelectromagnetica.html>

La radiación electromagnética (EM) se crea cuando una partícula atómica, como un electrón, es acelerada por un campo eléctrico, haciendo que se mueva. El movimiento produce campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que viajan en ángulo recto entre sí en un haz de energía luminosa llamada fotón. Los fotones viajan en ondas armónicas a la velocidad más rápida posible en el universo: 299, 792,458 metros por segundo en el vacío, también conocida como la velocidad de la luz. Las ondas tienen ciertas características dadas, como: frecuencia, longitud de onda o energía.

Una longitud de onda es la distancia entre dos picos consecutivos de una onda. Esta distancia se da en metros (m) o fracciones de esta. La frecuencia es el número de ondas que se forman en un período de tiempo determinado. Generalmente se mide como el número de ciclos de onda por segundo, o hertz (Hz). Una longitud de onda corta significa que la frecuencia será mayor porque un ciclo puede pasar en un período de tiempo más corto. Del mismo modo, una longitud de onda más larga tiene una frecuencia más baja porque cada ciclo tarda más en completarse.

Las ondas electromagnéticas deben su comportamiento a la longitud de onda que tengan, además cuando interactúa con moléculas y átomos su comportamiento en dichas interacciones depende de la energía que la onda EM tenga, dicha energía es importante tenerla en cuenta cuando se analicen la influencia de estas ondas EM producidas por los microondas, teléfonos móviles o equipos de rayos X.

Banda	Longitud de onda (metros)	Frecuencia (Herzios)	Energía (Julios)
Rayos gamma	10 picómetros = $10 * 10^{-12}$ m	30,0 ExaHz = $30 * 10^{18}$ Hz	$20 * 10^{-15}$ J
Rayos X	10 nanómetros = $10 * 10^{-9}$ m	30,0 PetaHz = $30 * 10^{15}$ Hz	$20 * 10^{-18}$ J
Ultravioleta extremo	200 nanómetros = $200 * 10^{-9}$ m	1,5 PetaHz = $1,5 * 10^{15}$ Hz	$993 * 10^{-21}$ J
Ultravioleta cercano	380 nanómetros = $380 * 10^{-9}$ m	789 TeraHz = $789 * 10^{12}$ Hz	$523 * 10^{-21}$ J
Luz visible	780 nanómetros = $780 * 10^{-9}$ m	384 TeraHz = $789 * 10^{12}$ Hz	$255 * 10^{-21}$ J
Infrarrojo cercano	2,5 micrómetros = $2,5 * 10^{-9}$ m	120 TeraHz = $789 * 10^{12}$ Hz	$79 * 10^{-21}$ J
Infrarrojo medio	50 micrómetros = $50 * 10^{-9}$ m	6,0 TeraHz = $789 * 10^{12}$ Hz	$4 * 10^{-21}$ J
Infrarrojo lejano	1 milímetro	300 GigaHz = $300 * 10^9$ Hz	$200 * 10^{-24}$ J
Microondas	30 cm	1 GigaHz = $1 * 10^9$ Hz	$2 * 10^{-24}$ J
Ultra alta frecuencia	1 metro	300 MegaHz = $300 * 10^6$ Hz	$19,8 * 10^{-26}$ J
Muy alta frecuencia de radio	10 metros	30 MegaHz = $300 * 10^6$ Hz	$19,8 * 10^{-28}$ J
Onda corta de radio	180 metros	1,7 MegaHz = $300 * 10^6$ Hz	$11,22 * 10^{-28}$ J
Onda media de radio	650 metros	650 KiloHz	$42,9 * 10^{-29}$ J
Onda larga de radio	10 kilómetros	30 KiloHz	$19,8 * 10^{-30}$ J
Muy baja frecuencia de radio	10 kilómetros	30 KiloHz	$19,8 * 10^{-30}$ J

Tabla 1. Longitud de onda, frecuencia y energía de cada banda de las ondas EM.

Recuperado de: <https://astrojem.com/radiacionelectromagnetica.html>

1.2 Semiconductores

Es un elemento que funciona como un conductor o como un aislante dependiendo de algunos factores, como el campo eléctrico o magnético, la radiación, la presión o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. [2]

Se puede decir entonces que los semiconductores establecen una contradicción intermedia entre los aislantes y los conductores. En el caso de los primeros, cuentan con escasas cargas móviles, lo que les permite tener una elevada resistencia al paso de la corriente. Mientras que los aislantes tienen una resistencia eléctrica muy baja (casi en cero) producto de su riqueza en dichas cargas. [3]

Los semiconductores más usados en la actualidad son el Silicio y el Germanio.

Los semiconductores pueden ser clasificados en dos categorías:

- *Intrínsecos*: Un material semiconductor hecho sólo de un único tipo de átomo, se denomina semiconductor intrínseco. Los más empleados históricamente son el germanio (Ge) y el silicio (Si); siendo este último el más empleado (por ser mucho más abundante y poder trabajar a temperaturas mayores que el germanio).
- *Extrínseco*: Un semiconductor al que se agrega una impureza a una velocidad controlada para que sea conductor se conoce como semiconductor extrínseco. Un semiconductor intrínseco es capaz de conducir una pequeña corriente incluso a temperatura ambiente, pero no es útil para la preparación de varios dispositivos electrónicos. Por lo tanto, para hacerlo conductivo, se agrega una pequeña cantidad de impureza adecuada al material, este proceso se conoce como dopante.

Dopante: El proceso por el cual se agrega una impureza a un semiconductor se conoce como Dopaje. La cantidad y el tipo de impureza que se agregará a un material debe controlarse estrechamente durante la preparación del semiconductor extrínseco. Generalmente, se agrega un átomo de impureza a 10⁸ átomos de un semiconductor. El propósito de agregar impurezas en el cristal semiconductor es aumentar el número de electrones libres o agujeros para que sea conductor. Si se agrega una impureza pentavalente, que tiene cinco electrones de valencia a un semiconductor puro, existirá una gran cantidad de electrones libres. Si se agrega una impureza trivalente que tiene tres electrones de valencia, existirá una gran cantidad de agujeros en el semiconductor. Dependiendo del tipo de impureza añadida, el semiconductor extrínseco se puede clasificar como semiconductor de tipo n y semiconductor de tipo p.

- *Semiconductor de tipo n*: En las redes de Si o Ge se introducen elementos del grupo 15 (VA) los cuales debido a que tienen un electrón más en su capa de valencia que los elementos del grupo 14 (IVA) se comportan como impurezas donadoras de electrones o portadores negativos.
- *Semiconductor de tipo p*: En este caso se introducen elementos del grupo 13 (IIIA) que presentan un electrón menos en su capa de valencia, por lo que se comportan como aceptores o captadores de electrones. [3]

Elemento	Grupo	EUC
<u>Cd</u>	II A	2 e ⁻
<u>Al</u> , <u>Ga</u> , <u>B</u> , <u>In</u>	III A	3 e ⁻
<u>Si</u> , <u>Ge</u>	IV A	4 e ⁻
P, As, Sb	V A	5 e ⁻
<u>Se</u> , <u>Te</u> , (S)	VI A	6 e ⁻

Figura 2. Elementos semiconductores

Recuperado: <http://materia20istrc.blogspot.com/>

1.3 Radiación electromagnética ionizante

La radiación ionizante es una forma de energía que actúa eliminando electrones de átomos y moléculas de materiales que incluyen aire, agua y tejido vivo. La radiación ionizante puede viajar sin ser vista y atravesar estos materiales. Un ejemplo familiar de radiación ionizante es el de los rayos X, que pueden penetrar en nuestro cuerpo y revelar imágenes de nuestros huesos. Decimos que los rayos X son "ionizantes", lo que significa que tienen la capacidad única de eliminar electrones de átomos y moléculas en la materia a través de la cual pasan. La actividad ionizante puede alterar las moléculas dentro de las células de nuestro cuerpo. Esa acción puede causar un daño eventual (como el cáncer). Las exposiciones intensas a la radiación ionizante pueden producir daños en la piel o los tejidos. Otros ejemplos de radiación ionizante incluyen los rayos alfa, beta y gamma de la desintegración radiactiva. La radiación ionizante puede penetrar en el cuerpo humano y la energía de radiación puede ser absorbida en el tejido. Esto tiene el potencial de causar efectos nocivos a las personas, especialmente a altos niveles de exposición.

Las fuentes naturales de radiación ionizante generalmente liberan radiación ionizante a niveles bajos, lo que también significa que las cantidades de radiación absorbidas por nuestros cuerpos

(dosis) generalmente son pequeñas. Las fuentes naturales de radiación ionizante incluyen elementos radiactivos que están naturalmente en nuestro cuerpo. Por ejemplo, una fracción muy pequeña del potasio en nuestros cuerpos es radiactiva. También podemos encontrar elementos como el radón que es un gas radioactivo natural que se encuentra en las formaciones rocosas y que puede liberar niveles más altos de radiación los cuales pueden presentar riesgos para la salud, esta es la segunda causa principal de cáncer de pulmón en los Estados Unidos. Los niveles de radón en su hogar o edificio dependen de una variedad de factores. Puede probar su casa o edificio para determinar si usted o su familia están en riesgo de altos niveles de exposición al radón.

La exposición a altas dosis de radiación ionizante puede causar quemaduras de la piel, caída del cabello, náusea, defectos de nacimiento, enfermedades o la muerte. Los efectos dependerán de la cantidad de radiación ionizante que recibió y por cuanto tiempo, y de factores personales tales como el sexo, edad a la que se expuso, y de su estado de salud y nutrición. Aumentar la dosis produce efectos más graves. [4]

Los exámenes de diagnóstico médico son la principal fuente artificial de exposición a la radiación ionizante. El objetivo de las imágenes de diagnóstico médico es que los beneficios superen con creces los riesgos. Se puede hacer un seguimiento del número y el tipo de estos exámenes de diagnóstico médico que se recibe regularmente para que se pueda conocer el historial y compartirlo con el médico de cabecera. Se debe consultar con el profesional de la salud sobre cómo ayudará un examen y si otra prueba que no contenga radiación ionizante puede proporcionar el mismo beneficio. Las imágenes por resonancia magnética (MRI) y la tecnología de ultrasonido son ejemplos de exámenes de diagnóstico que no implican exposición a radiación ionizante.

1.3.1 Efectos biológicos de la radiación ionizante

Es importante saber que la radiación ionizante controlada no representa ningún riesgo para nuestra salud. De hecho, las radiaciones conviven con nosotros, ya que se encuentran en la naturaleza y además son utilizadas para el beneficio del hombre en muchas áreas como la medicina o la industria. Sin embargo, un mal uso de las radiaciones ionizantes puede producir efectos perjudiciales en la salud.

Las radiaciones ionizantes, como su nombre indica, tienen la capacidad de producir ionizaciones en los átomos con los que interaccionan debido a su alta energía. Así, estas radiaciones pueden

alterar las estructuras químicas de las moléculas que forman las células de nuestro organismo. Si la molécula alterada es importante para el funcionamiento de la célula, como es el caso del ADN (ácido desoxirribonucleico), habrá consecuencias nocivas para la célula. Dependiendo, entre otros factores, de la dosis de radiación el daño producido será de mayor o menor gravedad, lo que a su vez determinará el tipo de efecto que puede producirse en el organismo. [5]

Una característica de la radiación ionizante en el cuerpo humano es que la energía absorbida es baja, pero los efectos biológicos son graves. Por ejemplo, después de recibir una dosis letal de 10Gy, la temperatura corporal solo aumentará en 0.02° C, pero la dosis puede provocar la muerte de todas las entidades expuestas.

La segunda característica son los efectos biológicos latentes de la radiación. Los efectos biológicos agudos pueden ocurrir dentro de varias horas a varios días, mientras que los efectos a largo plazo generalmente aparecen varios años después de la exposición. Los diferentes órganos tienen diferente sensibilidad a la radiación ionizante. Por ejemplo, las gónadas y la médula ósea son órganos más sensibles y los huesos son menos sensibles.

Dado que la radiación ionizante daña el ADN, que es crítico en la reproducción celular, tiene su mayor efecto en las células que se reproducen rápidamente, incluida la mayoría de los tipos de cáncer. Por lo tanto, las células cancerosas son más sensibles a la radiación que las células normales y pueden destruirse fácilmente. El cáncer se caracteriza por un mal funcionamiento de la reproducción celular y también puede ser causado por radiación ionizante. Sin contradicción, la radiación ionizante puede ser tanto una cura como una causa.

El informe del comité científico de las naciones unidas para el estudio de los efectos de las radiaciones atómicas evaluó los efectos en la salud y la inferencia de riesgos derivados de la exposición a la radiación. El Comité examinó los progresos realizados en la evaluación de determinados efectos en la salud y la inferencia de riesgos debidos a la exposición a radiaciones ionizantes. Se propusieron cuatro hipótesis de estudio a partir de criterios convenidos y revisiones bibliográficas preliminares: leucemia por exposición a dosis bajas; riesgo de cáncer sólido por exposición aguda y prolongada; riesgo de cáncer de tiroides por exposición a las radiaciones durante la infancia o la adolescencia; y riesgo de enfermedad circulatoria por exposición aguda y prolongada. El Comité esperaba que las evaluaciones se realizaran según los criterios de calidad

aplicables a los exámenes de estudios epidemiológicos del Comité y preveía que las evaluaciones preliminares se examinarían en el 64º período de sesiones. [13]

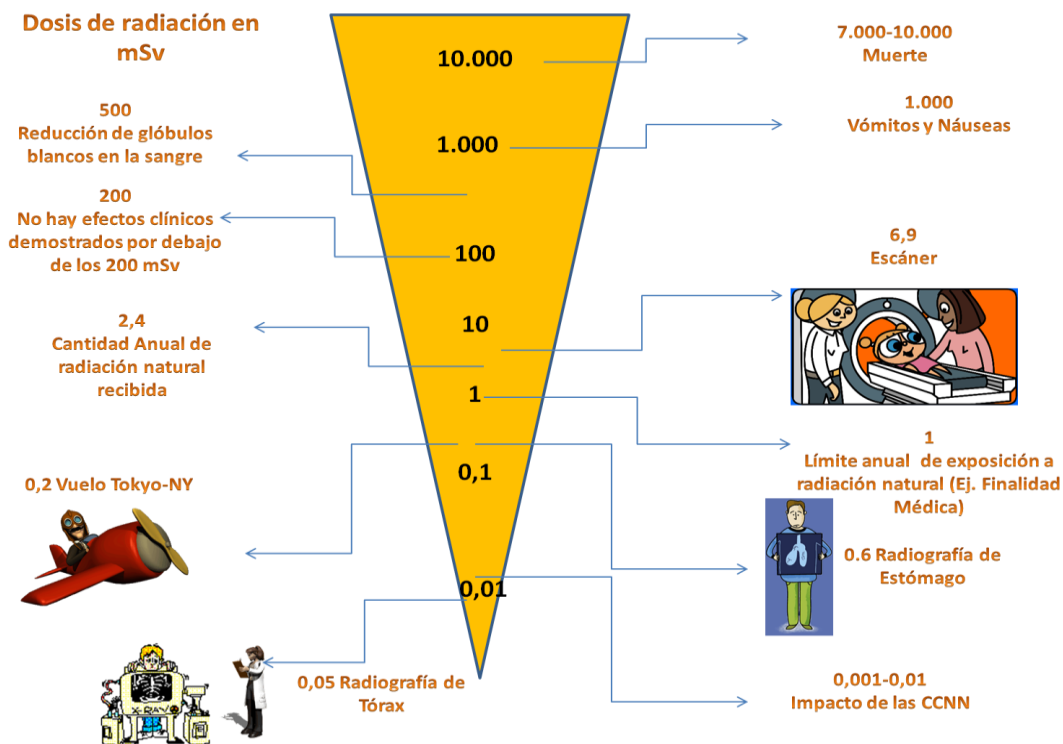


Figura 3. Dosis de radiaciones ionizantes y efectos.

Recuperado de:

http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/5efectos_biologicos_de_la_radiacin_ionizante.html

1.4 Espectro electromagnético

1.4.1 Rango del espectro

Amplitud, longitud de onda y frecuencia.

Una onda es una perturbación que se propaga a través de un determinado medio o en el vacío, con transporte de energía pero sin transporte de materia [6]. Está compuesta por un valle (punto más bajo) y una cresta (punto más alto). La distancia vertical entre la punta de una cresta y el eje central de la onda se conoce como su amplitud. Esta es la propiedad asociada con el brillo o la intensidad de la onda. La distancia horizontal entre dos valles o crestas consecutivas se conoce como la longitud de onda de la onda. Estas longitudes se pueden visualizar de la siguiente manera:

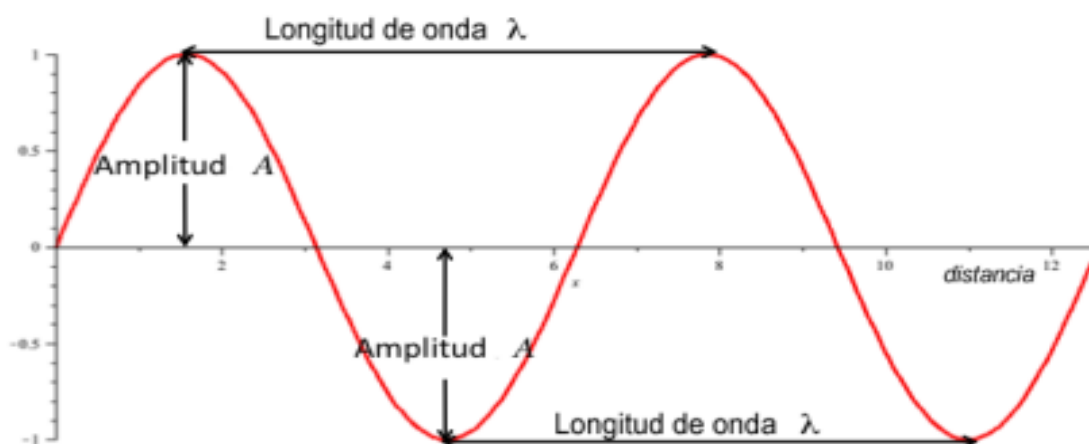


Figura 4. Longitud de onda y amplitud

Recuperado de: <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/tag/longitud-de-onda/>

Es para tener en cuenta que algunas ondas (incluidas las ondas electromagnéticas) también oscilan en el espacio y, por lo tanto, oscilan en una posición determinada a medida que pasa el tiempo. La frecuencia de la onda se refiere al número de longitudes de onda completas que pasan por un punto dado en el espacio cada segundo; la unidad en el SI para frecuencia es el Hertz, que es equivalente a "por segundo" (escrito como $\frac{1}{s}$ o s^{-1}).

La longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales: es decir, cuanto más corta es la longitud de onda, mayor es la frecuencia y viceversa. Esta relación está dada por la siguiente ecuación:

$$c = \lambda \nu$$

Donde λ es la longitud de onda (en metros, m) y ν es la frecuencia (en Hertz, Hz). Su producto es la constante c , la velocidad de la luz, que es igual a $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$. Esta relación refleja un hecho importante: toda la radiación electromagnética, independientemente de la longitud de onda o frecuencia, viaja a la velocidad de la luz.

Periodo

La última cantidad que se considerará es el período de una ola. El período de una onda es el tiempo que tarda una longitud de onda en pasar por un punto dado en el espacio. Matemáticamente, el período (T) es simplemente el recíproco de la frecuencia de la onda (f):

$$T = \frac{1}{f}$$

Las unidades del período son segundos (s).

Las ondas electromagnéticas se pueden clasificar y organizar de acuerdo con sus diversas longitudes de onda / frecuencias; Esta clasificación se conoce como espectro electromagnético. La figura 4 nos muestra este espectro, que consiste en todos los tipos de radiación electromagnética conocidos.

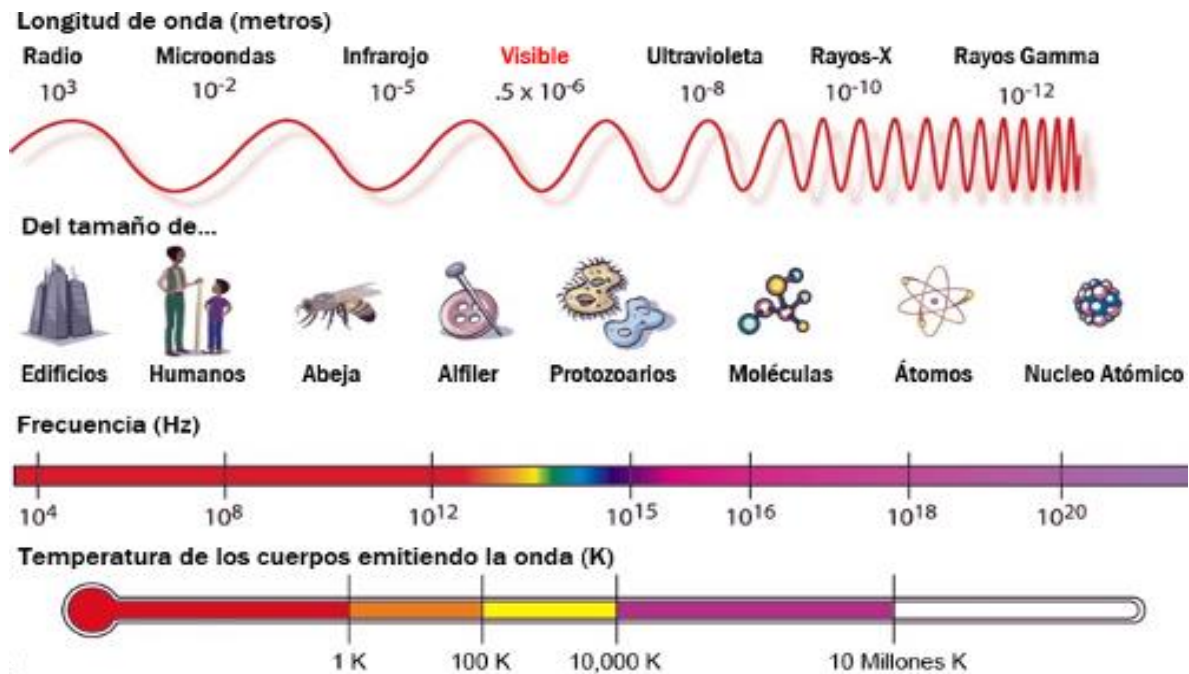


Figura 5. Diferentes longitudes de onda del espectro EM

Recuperado de: <http://fisicap4.org/fisica/electro/oem2.html>

Como se puede ver, el espectro visible que nuestros ojos pueden percibir es solo una pequeña parte del espectro EM.

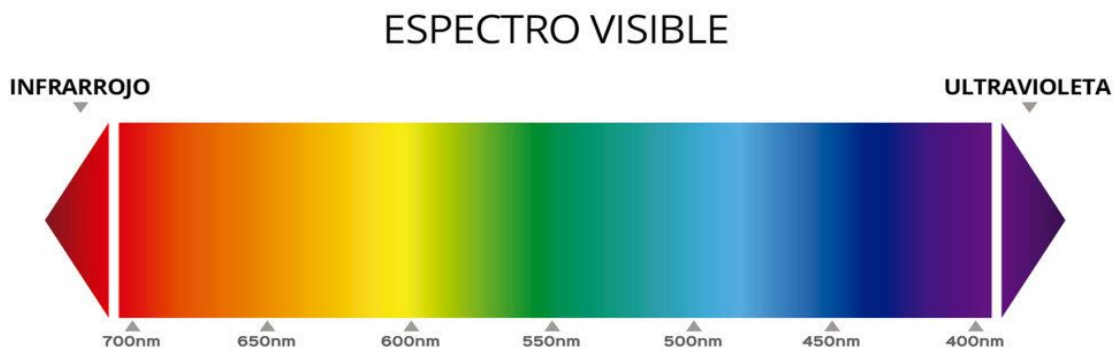


Figura 6. Espectro visible que percibe el ojo humano.

Recuperado de: <https://www.doctorlens.es/que-es-la-luz-azul-y-como-afecta-a-tus-ojos/espectro-visible-1024x415/>

Radiofrecuencia

Las ondas de radio suelen ser utilizadas mediante antenas del tamaño apropiado (según el principio de resonancia), con longitudes de onda en los límites de cientos de metros a aproximadamente un milímetro. Se usan para la transmisión de datos, a través de la modulación. La televisión, los teléfonos móviles, las resonancias magnéticas, o las redes inalámbricas y de radio-aficionados, son algunos usos populares de las ondas de radio.

Estas ondas pueden transportar información variando la combinación de amplitud, frecuencia y fase de la onda dentro de una banda de frecuencia. El uso del espectro de radio está regulado por muchos gobiernos mediante la asignación de frecuencias. Cuando la radiación electromagnética impacta sobre un conductor, se empareja con él y viaja a lo largo del mismo, induciendo una corriente eléctrica en la superficie de ese conductor mediante la excitación de los electrones del material de conducción. Este efecto (el efecto piel) es usado en las antenas. La radiación electromagnética también puede hacer que ciertas moléculas absorban energía y se calienten, una característica que se utiliza en las microondas.

Microondas

La frecuencia super alta (SHF) y la frecuencia extremadamente alta (EHF) de las microondas son las siguientes en la escala de frecuencia. Las microondas son ondas lo suficientemente cortas como para emplear guías de ondas metálicas tubulares de diámetro razonable. La energía de microondas se produce con tubos klistrón y tubos magnetrón, y con diodos de estado sólido como los dispositivos Gunn e IMPATT. Las microondas son absorbidas por las moléculas que tienen un momento dipolar en líquidos. En un horno microondas, este efecto se usa para calentar la comida. La radiación de microondas de baja intensidad se utiliza en Wi-Fi.

El horno microondas promedio, cuando está activo, está en un rango cercano y bastante poderoso como para causar interferencia con campos electromagnéticos mal protegidos, como los que se encuentran en dispositivos médicos móviles y aparatos electrónicos baratos.

Radiación infrarroja

La parte infrarroja del espectro EM cubre el rango desde aproximadamente los 300 GHz (1 mm) hasta los 400 THz (750 nm). Puede ser dividida en tres partes:

1. Infrarrojo lejano, desde 300 GHz (1 mm) hasta 30 THz (10 μm). La parte inferior de este rango también puede llamarse microondas. Esta radiación es absorbida por los llamados modos rotatorios en las moléculas en fase gaseosa, mediante movimientos moleculares en los líquidos, y mediante fotones en los sólidos. El agua en la atmósfera de la Tierra absorbe tan fuertemente esta radiación que confiere a la atmósfera efectividad opaca. Sin embargo, hay ciertos rangos de longitudes de onda ("ventanas") dentro del rango opaco que permiten la transmisión parcial, y pueden ser usados en astronomía. El rango de longitud de onda de aproximadamente 200 μm hasta unos pocos mm suele llamarse "radiación submilimétrica" en astronomía, reservando el infrarrojo lejano para longitudes de onda por debajo de los 200 μm .
2. Infrarrojo medio, desde 30 a 120 THz (10 a 2.5 μm). Los objetos calientes (radiadores de cuerpo negro) pueden irradiar fuertemente en este rango. Se absorbe por vibraciones moleculares, es decir, cuando los diferentes átomos en una molécula vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio. Este rango es llamado, a veces, región de huella digital, ya que el espectro de absorción del infrarrojo medio de cada compuesto es muy específico.
3. Infrarrojo cercano, desde 120 a 400 THz (2500 a 750 nm). Los procesos físicos que son relevantes para este rango son similares a los de la luz visible.

Radiación visible (luz)

La frecuencia por encima del infrarrojo es la de la luz visible. Este es el rango en el que el Sol y las estrellas similares a él emiten la mayor parte de su radiación. No es probablemente una coincidencia que el ojo humano sea sensible a las longitudes de onda que el sol emite con más fuerza. La luz visible (y la luz cercana al infrarrojo) son absorbidas y emitidas por electrones en las moléculas y átomos que se mueven desde un nivel de energía a otro. La luz que vemos con nuestros ojos es realmente una parte muy pequeña del espectro EM. Un arco iris muestra la parte óptica (visible) del espectro electromagnético; el infrarrojo (si pudiera verse) estaría localizado justo a continuación del lado rojo del arco iris, mientras que el ultravioleta estaría tras el violeta.

La radiación EM con una longitud de onda entre aproximadamente 400 nm y 700 nm es detectada por el ojo humano y percibida como luz visible. A otras longitudes de onda, sobre todo

al infrarrojo cercano (más largo de 700 nm) y al ultravioleta (más corto que 400 nm) también se les llama luz a veces, sobre todo cuando la visibilidad para los humanos no es relevante.

Si la radiación que tiene una frecuencia en la región visible del espectro electromagnético se refleja en un objeto, como por ejemplo un plato hondo de fruta, y luego impacta en nuestros ojos, obtenemos una percepción visual de la escena. El sistema visual de nuestro cerebro procesa la multitud de frecuencias reflejadas en diferentes sombras y matices, y a través de este fenómeno psicofísico que todavía no se entiende completamente, es como percibiríamos los objetos.

En la mayor parte de las longitudes de onda, sin embargo, la información transportada por la radiación electromagnética no es directamente descubierta por los sentidos humanos. Las fuentes naturales producen radiación electromagnética a través del espectro, y nuestra tecnología también puede manipular un amplio rango de longitudes de onda. La fibra óptica transmite luz que, aunque no es adecuada para la visión directa, puede transportar datos que luego son traducidos en sonido o imagen. La codificación usada en tales datos es similar a lo que se usa con las ondas de radio.

Luz ultravioleta.

La siguiente frecuencia en el espectro es el ultravioleta (o rayos UV), que es la radiación cuya longitud de onda es más corta que el extremo violeta del espectro visible.

Al ser muy energética, la radiación ultravioleta puede romper enlaces químicos, haciendo a las moléculas excepcionalmente reactivas o ionizándolas, lo que cambia su comportamiento. Las quemaduras solares, por ejemplo, están causadas por los efectos perjudiciales de la radiación UV en las células de la piel, y pueden causar incluso cáncer de piel si la radiación daña las moléculas de ADN complejas en las células (la radiación UV es un mutágeno). El Sol emite una gran cantidad de radiación UV, lo que podría convertir rápidamente la Tierra en un desierto estéril si no fuera porque, en su mayor parte, es absorbida por la capa de ozono de la atmósfera antes de alcanzar la superficie.

Rayos X

Después del ultravioleta vienen los rayos X. Los rayos X duros tienen longitudes de onda más cortas que los rayos X suaves. Se usan generalmente para ver a través de algunos objetos, así como

para la física de alta energía y la astronomía. Las estrellas de neutrones y los discos de acreción alrededor de los agujeros negros emiten rayos X, lo que nos permite estudiarlos.

Los rayos X pasan por la mayor parte de sustancias, y esto los hace útiles en medicina e industria. También son emitidos por las estrellas, y especialmente por algunos tipos de nebulosas. Un aparato de radiografía funciona disparando un haz de electrones sobre un "objetivo". Si los electrones se disparan con suficiente energía, se producen rayos X.

Rayos gamma

Después de los rayos X duros vienen los rayos gamma. Son los fotones más energéticos, y no se conoce el límite más bajo de su longitud de onda. Son útiles a los astrónomos en el estudio de objetos o regiones de alta energía, y son útiles para los físicos gracias a su capacidad penetrante y su producción de radioisótopos. La longitud de onda de los rayos gamma puede medirse con gran exactitud por medio de dispersión Compton. [7]

1.4.2 Rayos X

Los rayos X son una forma de radiación EM, similares a la luz visible. Sin embargo, a diferencia de la luz, los rayos X tienen una mayor energía y pueden pasar a través de la mayoría de los objetos, incluyendo el cuerpo. La longitud de onda de los rayos X está en el rango de 10-0.01 nm, las frecuencias en el rango de 30 peta hertz a 30 exahertz (3×10^{16} Hz a 3×10^{19} Hz), y las energías en el rango de 120 eV a 120 keV. Los rayos X no poseen carga, pues no se desvían bajo la acción de campos eléctricos y magnéticos. Estos rayos son capaces de penetrar cuerpos sólidos, los cuerpos constituidos por elementos ligeros son más transparentes a los rayos X que los constituidos por elementos pesados.

Los rayos X médicos se utilizan para generar imágenes de los tejidos y las estructuras dentro del cuerpo. Si los rayos X que viajan a través del cuerpo también pasan a través de un detector de rayos X al otro lado del paciente, se formará una imagen que representa las "sombras" formadas por los objetos dentro del cuerpo. [8]

Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por Wilhelm Conrad Röntgen, profesor de la Universidad de Würzburg en Alemania. Röntgen notó cristales cerca de un tubo de rayos catódicos de alto voltaje que exhibían un brillo fluorescente, incluso cuando los protegía con papel

oscuro. El tubo producía alguna forma de energía que penetraba en el papel y hacía que los cristales brillaran. Röntgen llamó a la energía desconocida "radiación X". Los experimentos mostraron que esta radiación podría penetrar en los tejidos blandos, pero no en los huesos, y produciría imágenes de sombras en las placas fotográficas. Por este descubrimiento, Röntgen recibió el primer Premio Nobel de física en 1901.



Figura 7. Primera radiografía de la historia de la mano de la esposa de Röntgen.

Recuperado de: <https://www.xatakaciencia.com/medicina/la-primer-radiografia>

Debido a su capacidad de penetrar ciertos materiales, los rayos X se utilizan para varias aplicaciones de evaluación y prueba no destructivas, particularmente para identificar fallas o grietas en los componentes estructurales. La radiación se dirige a través de una parte y hacia una película u otro detector. El gráfico de sombras resultante muestra las características internas y si la parte es sólida. Esta es la misma técnica utilizada en los consultorios de médicos y dentistas para crear imágenes de rayos X de huesos y dientes, respectivamente.

Las radiografías también son esenciales para las inspecciones de seguridad de transporte de carga, equipaje y pasajeros. Los detectores de imágenes electrónicas permiten la visualización en tiempo real del contenido de los paquetes y otros artículos de pasajeros. El uso original de los rayos

X era para obtener imágenes de los huesos, que se distinguían fácilmente de los tejidos blandos en la película que estaba disponible en ese momento. Sin embargo, los sistemas de enfoque más precisos y los métodos de detección más sensibles, como las películas fotográficas mejoradas y los sensores de imágenes electrónicas, han permitido distinguir detalles cada vez más finos y diferencias sutiles en la densidad de los tejidos, al tiempo que se utilizan niveles de exposición mucho más bajos.

1.4.3 ¿Cómo se producen los rayos X?

Se forman cuando los electrones van a gran velocidad y chocan con un blanco metálico. Parte de la energía cinética que llevan los electrones se transforma en fotones electromagnéticos, mientras que la otra parte se transforma en calor. [9]

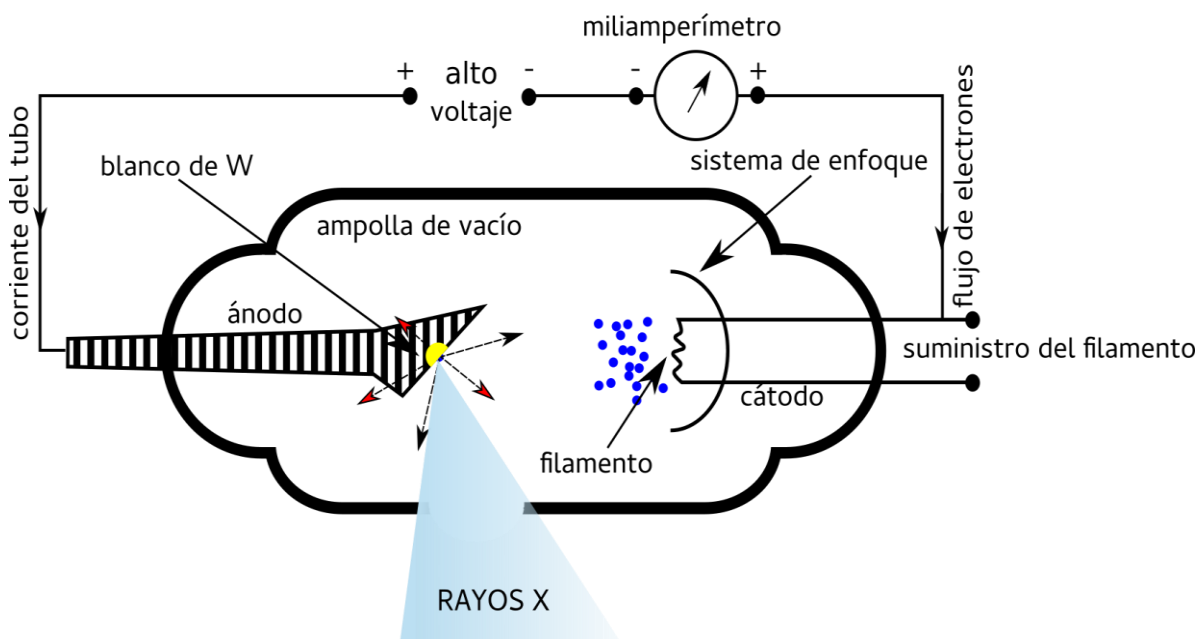


Figura 8. Esquema de un tubo de rayos X clásico de Tungsteno.

Recuperado de: <https://www.famaf.unc.edu.ar/~pperez1/manuales/cdr/tubos-de-rayos-x.html>

Como se puede observar, las partes principales de un tubo de rayos X incluyen:

- Ánodo

- Cátodo
- Generador de diferencia de potencial
- Generador de corriente
- Ampolla con vacío

El **ánodo**, también conocido como blanco o anticátodo, se encuentra generalmente formado por una pieza de cobre (Cu) con un blanco de tungsteno (W) o molibdeno (Mo). El blanco de W o Mo debe ser altamente refractario pues deberá conservar sus propiedades a altas temperaturas, mientras que debe estar adherido a un material como el Cu que funcione de disipador del calor al que es sometido.

El **cátodo**, compuesto por un filamento metálico, es calentado por una corriente eléctrica, lo que imparte calor a sus átomos y genera una “nube” de electrones libres en su superficie. Para generar esta nube, es necesario que el filamento alcance temperaturas muy elevadas, por lo que, aprovechando su alta temperatura de fusión, el filamento suele también ser de W, y la cantidad de electrones en la nube dependerá de la corriente en el filamento.

Al aplicarse una diferencia de potencial ΔV (o simplemente V) entre el ánodo y el cátodo dejando al ánodo como positivo (+), los electrones (de carga negativa) que han sido desprendidos del cátodo por el calentamiento (y se encuentran libres) se dirigirán al ánodo acelerándose por el campo eléctrico. Así, alcanzarán su velocidad máxima al llegar al ánodo. La energía cinética (asociada a la velocidad) de los electrones alcanzará un máximo dependiente del voltaje aplicado. Al tratarse de electrones, se puede expresar esta energía en electronvoltios (eV) y la máxima energía alcanzada corresponderá numéricamente a la diferencia de potencial V . Así, para una diferencia de potencial de 100 kV, tendremos electrones con una energía máxima de 100 keV.

El proceso que ocurre en la figura 8, para la producción de rayos X es el siguiente:

Primero los electrones serán arrancados del filamento por un proceso físico-químico llamado emisión termoiónica, después estos electrones serán acelerados dentro del tubo por una fuerza electromotriz (potencial eléctrico) y en función de cómo interactúen los electrones proyectil con los átomos del material se pueden obtener rayos X, principalmente por dos procesos físicos: la emisión por frenado y la emisión característica, cuyos procesos se producen simultáneamente.

- **Bremsstrahlung:**

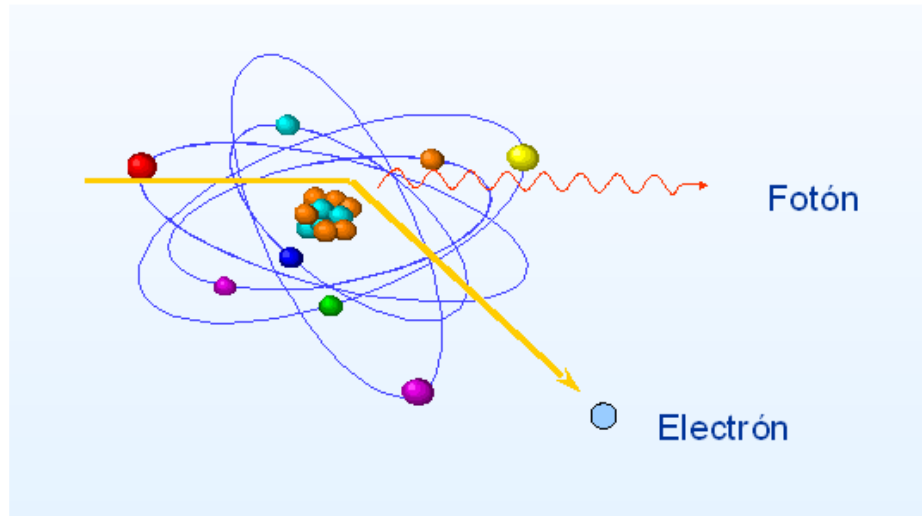


Figura 9. representación de la radiación de frenado o Bremsstrahlung

Recuperado de: <https://www.monografias.com/trabajos104/fisica-radiaciones/fisica-radiaciones.shtml>

En este proceso el electrón sufre una modificación brusca en su energía al pasar cerca del núcleo del átomo, como consecuencia de las grandes diferencias entre el electrón y el núcleo en su carga y en su masa. Este tipo de emisión se producen con interacciones inelásticas; la energía cinética que porta el electrón que es acelerado se modifica de forma brusca cuando se aproxima al átomo de wolframio y la diferencia de energía emite radiación electromagnética en el rango de los rayos X. Este supone el 85% de los fotones en el tubo.

Como resultado se obtienen fotones en el espectro continuo de energía desde cero hasta el máximo de energía cinética que portara el electrón (que se establece como KV pico en el tubo de rayos X)

- **Rayos X característicos:** el electrón incidente interactúa con un átomo blanco, eyecta un electrón de una de las capas y genera una vacancia que es ocupada por un electrón de energía superior; el que libera un fotón con energía cinética correspondiente a la diferencia de energía entre las capas.

Por la forma en la que son generados, los fotones característicos corresponderán a determinadas energías asociadas al material del ánodo, determinando un espectro discreto. Por otro lado, los fotones provenientes de la radiación de frenado conformarán un continuo de energía entre

0 y la energía máxima de los electrones, ya que estos últimos se deben a la desaceleración (proceso continuo) de los electrones. [10]

Resumen de pasos:

El procedimiento es el siguiente:

- Se pasa una corriente a través del filamento de tungsteno y se calienta.
- A medida que se calienta, el aumento de energía permite que los electrones se liberen del filamento a través de la emisión termoiónica.
- Los electrones son atraídos hacia el ánodo cargado positivamente y golpean el objetivo de tungsteno con una energía máxima determinada por el potencial del tubo (voltaje).
- A medida que los electrones bombardean al objetivo, interactúan a través de Bremsstrahlung e interacciones características que resultan en la conversión de energía en calor (99%) y fotones de rayos X (1%).
- Los fotones de rayos X se liberan en un haz con un rango de energías (espectro de rayos X) fuera de la ventana del tubo y forman la base para la formación de imágenes de rayos X.

1.5 Detectores de rayos x a partir de semiconductores

1.5.1 Funcionamiento de los detectores de radiación X a partir de semiconductores

Los rayos X que, según las longitudes de onda se dividen en rayos duros, suaves y ultrasuaves. Una radiación espontánea de la materia no necesariamente debe ser electromagnética: existe la llamada radiación nuclear, que es la emisión de partículas desde los núcleos atómicos. Una desintegración atómica espontánea puede ser de dos tipos: las partículas cargadas (partículas α y β y protones) y las partículas no cargadas, que son los neutrones. Algunas partículas son complejas como las partículas α , que son los núcleos de átomos de helio que consisten en dos neutrones, mientras que otras partículas son generalmente más simples, como las partículas β que son electrones o positrones. Las radiaciones ionizantes reciben ese nombre porque a medida que pasan a través de diversos medios que absorben su energía, se crean iones, fotones o radicales libres adicionales.

La unidad SI de radioactividad es el Becquerel (Bq), que es igual a la actividad de radionúclidos en descomposición a la velocidad de una transición espontánea por segundo. Por lo tanto, el becquerel se expresa en una unidad de tiempo: $\text{Bq} = \text{s}^{-1}$. Para convertir a la antigua unidad histórica que es el curie, el becquerel debe multiplicarse por 3.7×10^{10} .

La dosis de radiación absorbida se mide en grays (Gy). Un gray es la dosis absorbida cuando la energía por unidad de masa impartida a la materia por radiación ionizante es de 1 J / kg . Es decir, $\text{Gy} = \text{J / kg}$.

Cuando se requiere medir la exposición a los rayos X y γ , la dosis de radiación ionizante se expresa en coulombs por kg, que es una exposición que resulta en la producción de 1 C de carga eléctrica por 1 kg de aire seco. En SI, una unidad de C / kg reemplaza una unidad más antigua de roentgen.

El principio de funcionamiento de los semiconductores en general se basa en el efecto en el que el flujo externo (partículas elementales, rayos X o radiación gamma) incide en la capa de barrera de semiconductores polarizada inversamente y genera en ellos portadores de no equilibrio (pares electrón-agujero). En presencia de un voltaje externo, los portadores se mueven hacia los electrodos del detector. Por lo tanto, se genera un pulso de corriente en el circuito externo del detector de semiconductores y la amplitud de dicho pulso es proporcional a la energía que se pierde por partículas o fotones gamma en el detector. Luego, el pulso actual se transforma en un pulso de voltaje para ser amplificado y detectado.

1.5.1.1 ¿Cómo funcionan los detectores de radiación?

La función de cualquier sensor de radiación depende de la manera en que la radiación interactúa con el material del elemento de detección.

Hay cuatro tipos generales de detectores de radiación: los detectores de centelleo, los detectores gaseosos, los detectores de líquidos y los detectores de semiconductores. Además, todos los detectores se pueden dividir en dos grupos según su funcionalidad: los detectores de colisión y los detectores de energía. El primero simplemente detecta la presencia de una partícula radiactiva, mientras que el segundo puede medir la energía radiactiva. Es decir, todos los detectores pueden ser cuantitativos o cualitativos.

La mejor resolución de energía en los detectores de radiación modernos se puede lograr en los materiales semiconductores, donde se produce un número comparativamente grande de portadores

para un evento de radiación incidente determinado. En estos materiales, los portadores de información básica son pares de electrones y agujeros creados a lo largo del camino tomado por la partícula cargada a través del detector. La partícula cargada puede ser radiación primaria o una partícula secundaria. Los pares electrón-agujero en algunos aspectos son análogos a los pares de iones producidos en los detectores llenos de gas. Cuando se aplica un campo eléctrico externo al material semiconductor, los portadores creados forman una corriente eléctrica medible. Los detectores que funcionan según este principio se denominan detectores de diodos semiconductores o de estado sólido. El principio de funcionamiento de estos detectores de radiación es el mismo que el de los detectores de luz semiconductores. Se basa en la transición de electrones de un nivel de energía a otro cuando ganan o pierden energía

La mayoría de los detectores de radiación presentan un comportamiento similar: primero la radiación entra en el detector e interacciona con los átomos de éste, fruto de esta interacción, la radiación cede toda o parte de su energía a los electrones ligados de estos átomos y se libera un gran número de electrones de relativamente baja energía, que son recogidos y analizados mediante un circuito electrónico.

A temperatura ambiente, un pequeño número de electrones (en torno a 1 de cada 10⁹) se encuentran térmicamente excitados en la banda de conducción, dejando una vacante en la banda de valencia. A medida que los electrones de los átomos cercanos van llenando esa vacante (creando en el proceso una nueva vacante), ésta parece moverse a través del cristal, pero en realidad los átomos cargados positivamente no se mueven.

Cuando se ponen en contacto un material de tipo-p con uno de tipo-n (hay que recordar que la denominación tipo-n o tipo-p hacen referencia al signo de la carga de los conductores de corriente eléctrica), los electrones del semiconductor de tipo-n pueden difundirse a través de la unión en el semiconductor de tipo-p y combinarse con las vacantes. En las proximidades de la unión p-n, los conductores de carga son neutralizados, creando una región denominada *zona de depleción*. La difusión de electrones de la región tipo-n deja atrás estados ionizados donores fijos, mientras que en la región tipo-p quedan estados aceptores fijos cargados negativamente. Se crea por tanto un campo eléctrico que finalmente impide que la difusión continúe. Se forma una unión p-n típica de un diodo.

Si alguna radiación penetra en la zona de depleción y crea un par electrón-hueco, el resultado es muy similar al de una cámara de ionización. De hecho, la zona de depleción tiene un gran

parecido con un condensador plano-paralelo. Los electrones fluyen en una dirección y las vacantes en la otra. El número final de electrones recogidos pueden crear un pulso electrónico cuya amplitud es proporcional a la energía de la radiación.

En la práctica estos detectores operan con grandes voltajes inversos (1000-3000V) que aumentan la magnitud del campo eléctrico en la región de depleción (haciendo más eficiente la recogida de la carga) y aumentando la región de depleción (aumentando el volumen de sensibilidad del detector) forzando a más cargas que se desplacen de un tipo de material al otro.

Para partículas cargadas, la mejor elección es un detector de barrera de superficie, en el que una capa tipo-p extremadamente fina se deposita en una superficie de Si de tipo-n. Una fina capa de oro es entonces evaporada en la superficie frontal para servir de contacto eléctrico. El grosor total que las partículas deben penetrar para alcanzar la región de depleción es de unos 0.1 mm.

El tiempo necesario para recoger la carga de un detector de gran volumen se encuentra en el rango de 10-100 ns, dependiendo de la geometría del detector (plano o coaxial) y en el punto de entrada de la radiación respecto a los electrodos. Este tiempo es mucho menor que el que se tiene con una cámara de ionización, dado que aquí el recorrido que deben hacer las cargas creadas se ve reducido en varios órdenes de magnitud.

Otra ventaja de estos detectores consiste en que como se necesita menor energía para crear un par electrón-hueco (~ 3.6 eV/par en Si a 300K), se obtiene una excelente resolución energética.

El diseño de los detectores está basado en el conocimiento de la interacción de las radiaciones con la materia. Como ya sabemos, las radiaciones depositan energía en los materiales, principalmente a través de la ionización y excitación de sus átomos. Además, puede haber emisión de luz, cambio de temperatura, o efectos químicos, todo lo cual puede ser un indicador de la presencia de radiación.

Debido a la baja densidad de un gas (comparado con un sólido), los detectores gaseosos tienen baja eficiencia para detectar rayos X o gamma (típicamente del orden de 1%) pero detectan prácticamente todas las alfas o betas que logran traspasar las paredes del recipiente.

Cuando se utilizan detectores de semiconductores, se deben considerar seriamente varios factores. Entre ellos se encuentran la capa de banda muerta del detector y el posible daño por radiación. Si entran en el detector partículas cargadas pesadas u otras radiaciones que penetran débilmente, puede haber una pérdida de energía significativa antes de que la partícula alcance el

volumen activo del semiconductor. La energía puede perderse en el electrodo metálico y en un cuerpo de silicio relativamente grueso inmediatamente debajo del electrodo. Este grosor debe ser medido directamente por el usuario si se desea una compensación precisa. La técnica más simple y utilizada es variar el ángulo de incidencia de una radiación de partículas cargadas monoenergéticas.

Cualquier uso excesivo de los detectores puede provocar algún daño en la red de la estructura cristalina, debido a los efectos disruptivos de la radiación que se mide a medida que pasa a través del cristal. Estos efectos tienden a ser relativamente menores para la radiación ligeramente ionizante (partículas β o rayos γ), pero pueden volverse bastante significativos en condiciones típicas de uso para partículas pesadas. Por ejemplo, la exposición prolongada de los detectores de barrera de superficie de silicio a fragmentos de fusión conducirá a un aumento medible en la corriente de fuga y una pérdida significativa en la resolución de energía del detector

1.5.1.2 Eficiencia de un detector

No todas las radiaciones que llegan a un detector producen un pulso. La eficiencia de un detector está dada por la relación entre el número de radiaciones que cuenta y el número que le llegó. Una eficiencia de 100% implica que todas las radiaciones que llegan son detectadas. En cambio, una eficiencia de 1%, por ejemplo, significa que de cada 100 radiaciones que recibe, cuenta sólo una. Es importante conocer la eficiencia de cualquier detector para tomarla en cuenta al calcular la dosis recibida.

Hay varias circunstancias que afectan la eficiencia de un detector. Una de ellas es el tipo y la energía de la radiación. Las eficiencias relativas de un detector para alfas, betas, gammas o neutrones son muy diferentes, debido a los diferentes mecanismos de interacción de cada uno de ellos con materia (ya sea el material del detector o de su envoltura). Consideremos la eficiencia de un contador Geiger para radiación externa. Las partículas alfa no logran traspasar las paredes del recipiente, así que su eficiencia es cero. Las betas, en cambio, serán contadas en la medida en que puedan atravesar las paredes del recipiente; si éstas son delgadas podrá detectar la mayoría que le lleguen. Los rayos X y gamma en general pueden atravesar las paredes, pero la probabilidad de que ionicen el gas es pequeña por su baja densidad; sin embargo, esto no impide su uso en términos generales. Para detectar neutrones los contadores Geiger convencionales no sirven.

La energía de las radiaciones incidentes es otro parámetro que afecta la eficiencia de un detector. Para empezar, la energía de partículas alfa o beta determina si éstas son capaces de cruzar la envoltura y ser contadas. En el caso de rayos X o gamma, el poder de ionización depende del coeficiente de absorción para cada uno de los tres efectos (fotoeléctrico, Compton o pares). Como ya se vio, éste depende de la energía de los fotones, y en general es muy grande para bajas energías, así que es de esperarse que los contadores en general tengan mayor eficiencia con bajas energías de rayos X o gamma.

El material del detector afecta su eficiencia, principalmente por su densidad. Los detectores sólidos son más eficientes que los gaseosos porque hay más materia que ionizar. Además, en los gaseosos la presión del gas determina la eficiencia. También el tamaño de un detector es determinante para su eficiencia, porque en un detector grande hay más materia que ionizar, además de que es más difícil que la radiación se escape.

Finalmente, el aparato asociado desempeña un papel importante, por ejemplo, el circuito electrónico y el indicador de corriente en los detectores gaseosos. El acoplamiento eléctrico del detector al circuito, el nivel de discriminación para eliminar ruido electrónico, los valores y la precisión de los voltajes empleados, la magnitud de amplificación de los pulsos, la sensibilidad del indicador de carátula, la precisión de las escalas del indicador, son factores que afectan la eficiencia de conteo. Además, es importante señalar que la eficiencia debe referirse a la combinación detector-circuito-indicador, y no sólo a una parte.

Los monitores de radiación y los dosímetros dan lecturas en unidades de exposición, de dosis absorbida o de dosis equivalente. Los pulsos que produce el detector se tienen que transformar a estas unidades. Siempre hay lugar a error en las lecturas debido a los procesos descritos. Los fabricantes generalmente calibran sus aparatos por comparación con fuentes de características conocidas (patrones), y recomiendan cómo se deben usar y cómo se pueden garantizar lecturas correctas. Además, algunas de sus características van cambiando con el tiempo, así que se deben verificar de vez en cuando. [12]

Por último, es de primordial importancia seleccionar el detector adecuado a la radiación que se desea medir. El no hacerlo puede conducir a errores graves.

1.5.2 ¿Por qué semiconductores?

Los semiconductores tienen mayores ganancias intrínsecas porque los electrones unidos se liberan más fácilmente, por ejemplo, por radiación o calor, y se miden en solo unos pocos eV. Los gases raros tienen valores de unos 10 s de eV. Además, los detectores de semiconductores son superiores a sus mejores análogos mundiales en cuanto a velocidad de operación y resolución espacial. Esto ha ampliado las áreas de aplicación de detectores basados en semiconductores de composición compleja (GaAs sobre todo).

Los semiconductores tienen otra ventaja única. Se pueden fabricar de tal manera que agoten la mayor parte de su carga libre, revelando así una capa altamente sensible a los rayos X. Esto se logró formando un diodo de unión p-n de polarización inversa. Para explicar esto, debemos observar las propiedades de los semiconductores que los hacen tan especiales.

Las aplicaciones más prometedoras de los detectores de elementos múltiples son las siguientes:

- Tomógrafos digitales de baja dosis, mamografías, sistemas dentales, diagnóstico de cáncer y sistemas de rayos X para diagnóstico óseo;

- Dispositivos de prueba no destructivos y laminógrafos con una resolución espacial de hasta 0.02 mm, sistemas de examen aduanero de alta eficiencia y sistemas de seguridad de baja dosis en aeropuertos, estaciones de ferrocarril, líneas principales y otros lugares concurridos donde la probabilidad de actos terroristas puede ser reducido, y el manejo de mercancías y cargas peligrosas puede ser controlado. La investigación del detector está destinada a resolver estos problemas e incluye las siguientes áreas de exploración científica:

- Desarrollo de procesos de producción de materiales detectores (GaAs y compuestos relacionados), incluidos aquellos compensados por impurezas de nivel profundo en procesos de difusión y epitaxiales en fase de vapor y líquido;

- Investigaciones de las características electrofísicas, fotoeléctricas y pulsadas de materiales, estructuras y detectores de detectores;

- Desarrollo de diseños y procesos avanzados de detectores de rayos γ , rayos X e iones y neutrones;

- Desarrollo, fabricación y montaje de módulos de imágenes digitales para diferentes sistemas digitales y de diagnóstico;

- Desarrollo y construcción de microstrip y detectores de coordenadas de píxeles y detectores de imágenes de rayos X y γ de una nueva generación; y

- Desarrollo de sistemas radiográficos digitales basados en detectores cuánticos sensibles y módulos de imágenes digitales para aplicaciones médicas y de ingeniería.

1.6 Generación de carga por radiación

Para conocer cómo se genera la carga móvil y posteriormente se recoge para proporcionar una señal, se dirigirá la atención al efecto fotoeléctrico, ya que este es, con mucho, el modo más significativo de generación de carga para las energías de rayos X que son de interés en la espectroscopia, generalmente de 100 eV a ~30 keV.

En el efecto fotoeléctrico, los rayos X como entidad se absorben por completo y su energía se transfiere en gran medida a un electrón atómico (el fotoelectrón) del semiconductor. La energía diferirá según la energía de unión del electrón atómico. Entonces, en este punto, tenemos esencialmente un detector de partículas cargadas, aunque con la fuente interna del detector. Esto, por cierto, es una gran ventaja que tiene el detector de rayos X sobre los detectores convencionales de partículas cargadas (α , β , etc.), ya que se está menos preocupado por el material muerto de la ventana. Una preocupación mayor es la recolección eficiente de toda la carga generada en la región de agotamiento del semiconductor. La pérdida de este electrón de la capa interna crea una vacante que puede ser profunda (un electrón de capa K es lo más probable). Esto puede considerarse como un "agujero profundo", aunque el "agujero" generalmente está restringido a un electrón faltante en el enlace covalente que puede contribuir a un flujo de corriente.

El átomo semiconductor que quedó en un estado excitado puede relajarse de nuevo al estado fundamental mediante una serie de mecanismos. Un electrón de un nivel atómico más alto puede llenar la vacante con el exceso de energía arrastrado por la emisión de rayos X (fluorescencia) o la expulsión de un electrón. En general, vemos que habrá un efecto en cascada que producirá rayos X, que generalmente serán absorbidos por las interacciones fotoeléctricas secundarias con otros átomos. [37]

2. ESTADO DEL ARTE

Actualmente los detectores de radiación para aplicaciones médicas tienen un valor muy alto en el mercado y son de difícil acceso. En la física medica como en las diferentes áreas en las que están presentes las radiaciones ionizantes es de vital importancia monitorear la dosis que reciben los pacientes, así como la recibida por los trabajadores profesionalmente expuestos, es por eso por lo que la dosimetría se ha vuelto tan importante en esta área y con esto ha llegado la necesidad de tener mediciones cada vez más precisas por lo que surge la dosimetría personal y dosimetría ambiental.

Se han usado detectores de ionización de gran tamaño a lo largo del tiempo entre ellos detectores gaseosos de ionización, cámara de ionización, contadores profesionales y contadores Geiger-Müller, ahora están surgiendo cámaras de ionización de bolsillo que son más pequeños comparado con los que se han usado hasta el momento, se han fabricado dosímetros de termoluminiscencia, dosímetro de película fotográfica y detectores de semiconductores.

Estos detectores presentan para ciertas aplicaciones ventajas notables frente a los considerados anteriormente. En primer término, y por la mayor densidad del material, las partículas ionizantes pierden toda su energía en un recorrido muy corto. Se puede conseguir por tanto una gran eficiencia de detección por unidad de volumen del detector.

Por otra parte, para producir un par electrón-hueco se necesita consumir tan sólo una energía de 3,5 eV en silicio y 2,8 eV en germanio. Estos valores son unas ocho veces menores que los necesarios, por término, para ionizar un átomo de un gas. Por tanto, para una misma energía de las partículas ionizantes se liberarán en un detector de semiconductor un número de cargas eléctricas notablemente mayor que en un detector de ionización. Esto da lugar, a una mayor precisión en la medida de la energía de las partículas o fotones. [53]

Los detectores de rayos X a partir de semiconductores están siendo aplicados actualmente en física de alta energía, espectroscopía de fuentes cósmicas de rayos X, análisis fluorescente de rayos X. Actualmente hay artículos académicos donde se describen los estudios hechos sobre los detectores de radiación ionizante.

En el 2016 se publicó en la Universidad de Guanajuato el artículo de investigación “Desarrollo de un detector de rayos X usando fotodiodos” [54] donde diseñan e implementan un detector de rayos X para dicha institución.

En el Instituto nacional de investigaciones nucleares se publicó el artículo “Medición de rayos X con detectores de semiconductor tipo PIN” [55], donde presentan los resultados experimentales del uso de detectores tipo PIN orientado específicamente al área de física médica.

A pesar de que los detectores de radiación ionizante abarcan muchos campos de aplicación, es en el campo de la física médica donde más importancia cobra, en radiología, radioterapia, medicina nuclear es un instrumento casi imprescindible.

En el artículo de la UAEM “Prototipo para la medición de parámetros en una unidad de mamografía utilizando fotodiodos” [56] se muestran los resultados experimentales de un prototipo de detección de radiación ionizante usado en el área de mamografía de una institución médica.

Proyectos como estos son importantes para llegar en un futuro a la implementación comercial de este tipo de instrumentos que son una herramienta auxiliar en los programas de garantía de calidad en radiodiagnóstico y que impulsaría la renovación y seguridad de las distintas instituciones que trabajan día a día con radiaciones ionizantes.

3. METODOLOGÍA

La presente propuesta de trabajo de grado se clasifica dentro de la modalidad de investigación aplicada, la cual se enfoca en conseguir conocimiento sobre cómo y con qué materiales se construye un prototipo para la detección de la radiación de los rayos X a partir del semiconductor óptimo para este, determinando también los posibles usos de esta investigación, esto se realizará de acuerdo con los objetivos planteados anteriormente, en unas facetas de la siguiente manera:

Fase 1: Las primeras semanas se procedió a la búsqueda e investigación de la bibliografía pertinente para el conocimiento y estudio del tema a tratar, en la primera parte se investigaron los temas correspondientes a la radiación, los diferentes tipos de radiaciones, el espectro electromagnético y sus diferentes divisiones, también se profundiza en la investigación y explicación de que son los rayos X, como se producen, sus aplicaciones y sus riesgos. La siguiente parte de la investigación fue la búsqueda de la bibliografía correspondiente a los semiconductores, sus características, los diferentes tipos y los materiales que los componen.

Fase 2: Después de la recopilación de la bibliografía correspondiente a los semiconductores se estudiaron los diferentes tipos de sensores destinados a la detección de radiación ionizante entre los cuales están los fotodiodos PN, fotodiodos de avalancha (APD), fotodiodos Schottky, sensores de microbandas, sensores de arrastre, dispositivos acoplados por cargas, sensores de pixel activos (APS), se realizó además una investigación a fondo de varios materiales semiconductores usados en la detección de radiación ionizante, utilizando los recursos bibliográficos recopilados, se clasificaron y enunciaron las distintas ventajas y desventajas de cada material semiconductor y se buscó encontrar un sensor muy sensible a la radiación X, después de investigar y estudiar los distintos materiales, se llevó a cabo la selección del o los semiconductores óptimos para la detección de radiación ionizante de los rayos X a una temperatura ambiente.

Fase 3: Después de elegido el material a utilizar como sensor para el prototipo del detector de rayos X se procedió a hacer su correspondiente montaje electrónico donde se muestra cada componente electrónico usado, su respectiva conexión y su uso.

Fase 4: Después de haber determinado el detector a usar en la investigación y luego de finalizar el montaje electrónico, se procede a realizar el diseño mecánico 3D del prototipo del detector de radiación de rayos x, se mostrará el ensamble paso a paso del prototipo desde los materiales usados, las medidas de los componentes, sus características hasta la obtención del diseño final y se dará una explicación de su uso.

4. MATERIALES PARA LA DETECCIÓN DE RADIACIÓN

4.1 Grupo IV y IV-IV Materiales

Esta agrupación contiene los semiconductores elementales clásicos, Si, Ge y C (diamante) que cristalizan en la estructura del diamante y son únicos en la tabla periódica en que sus capas externas están exactamente llenas hasta la mitad. En consecuencia, solo se unen covalentemente. Un examen de las propiedades de los elementos del grupo IV muestra que la banda prohibida, la dureza y los puntos de fusión disminuyen con el aumento de Z, mientras que la movilidad del portador de carga,

la densidad y las constantes de la red generalmente aumentan. Estas tendencias pueden atribuirse a la metalización progresiva de los elementos con el aumento de Z dentro del grupo. También se pueden combinar dos semiconductores del grupo IV diferentes para obtener compuestos como SiC y SiGe cuyas propiedades físicas y electrónicas son intermedias.

Carburo de silicio

El carburo de silicio (SiC) se está explorando actualmente como una alternativa de Si de alta temperatura que también es química y tolerante a la radiación. Tiene varias ventajas distintas sobre el Si, ya que tiene el doble de conductividad térmica y ocho veces el campo eléctrico de ruptura máxima. La primera propiedad es importante para producir dispositivos semiconductores térmicamente estables o de alta potencia, mientras que la segunda significa que se pueden aplicar sesgos mucho más altos, lo que resulta en velocidades de deriva más altas y una recolección de carga más eficiente.

También tiene una alta velocidad de deriva de electrones saturados (casi el doble que la del Si), lo que garantiza una baja probabilidad de atrapamiento, así como una alta energía umbral de desplazamiento de 21.8 eV, lo que garantiza una alta tolerancia a la radiación. La banda ancha (tres veces mayor que la del Si) significa que las corrientes oscuras son extremadamente bajas, lo que en principio debería permitir el funcionamiento a alta temperatura hasta + 700 °C. De hecho, los dispositivos SiC n-MOS (semiconductores de óxido de metal de tipo n) han sido operados con éxito y sometidos a ciclos térmicos hasta 630 °C.

4.1.1 Semiconductores elementales

El silicio (Si) y el germanio (Ge) han sido durante mucho tiempo los semiconductores más utilizados para la detección de radiación y, por lo tanto, sirven como materiales de referencia. Desde 1970, la pureza ($\sim 10^{12} \Omega \text{ cm}$) de estos dos semiconductores elementales (Si y Ge) ha alcanzado un estado donde la purificación adicional es casi imposible. Por lo tanto, físicamente, son únicos por su pureza relativamente alta y por el hecho de que son semiconductores monoelementales. El otro semiconductor elemental que se está utilizando es el diamante. Tiene un alto intervalo de banda y es una opción adecuada como detector de radiación para física de alta energía. Desafortunadamente, el detector de radiación de diamante presenta un desafío de eficiencia debido a su tamaño limitado.

Las desventajas de estos materiales son el proceso de crecimiento, la complejidad operativa, la necesidad de alta pureza y los cristales sin defectos para promover la transferencia de carga completa a gran distancia.

Germanio

El germanio (Ge) es un material bien conocido para la detección de partículas, rayos gamma y rayos X. Es ampliamente utilizado en física de alta energía, física nuclear, pruebas de materiales y seguridad. La principal ventaja de Ge sobre otros materiales de alta Z es que está disponible en obleas y lingotes grandes con una calidad de material extremadamente alta. Esto a su vez se debe a que Ge es un semiconductor elemental con una larga historia de desarrollo. El principal inconveniente de Ge es que tiene un intervalo de banda estrecho igual a 0,67 eV, lo que significa que debe enfriarse a bajas temperaturas para evitar una corriente de fuga excesiva.

Los detectores de germanio con varios cientos de cm^3 de volumen son comunes y la vida útil de los portadores es amplia para proporcionar una excelente eficiencia de recolección de carga. Los cristales de germanio se pueden cultivar con una pureza extremadamente alta, por lo que se pueden agotar grandes volúmenes con campos muy por debajo de los niveles de descomposición.

Silicio

El detector de semiconductores más utilizado es el silicio, este tiene un intervalo de banda significativamente mayor en comparación con el germanio y, por lo tanto, se puede usar como material sensible en detectores de radiación para operar a temperatura ambiente. Sin embargo, debido a su baja Z y densidad, el silicio no es eficiente en la detección directa de fotones de alta energía como rayos X, rayos gamma y fotones de aniquilación 511 keV, los sustratos de Si de alta resistencia de 300 μm son solo ~10% eficientes para la detección de rayos X a aproximadamente 25 keV

Diamante

El diamante puede detectar cualquier radiación (rayos UV, rayos X y rayos gamma (γ)) y partículas cargadas, incluidas partículas de muy alta energía, neutrones y piones que generan portadores libres (pares de electrones) en el material. Es un material extremadamente duro y

resistente con alta resistividad y tiene un ancho de banda amplio (5.5 eV). El mecanismo fundamental de detección de radiación en el diamante es independiente de la radiación excitante, siempre que sea más energético que el intervalo de banda. Debido a su alto punto de fusión y escasez de diamantes naturales, muchas ideas de científicos e ingenieros se han visto obstaculizadas. El diamante industrial se ha sintetizado utilizando alta presión (50–100 kbar) y alta temperatura (1.800–2.300 K).

El diamante de deposición química de vapor (CVD) se ha propuesto para su uso en entornos hostiles, calientes, corrosivos y de muy alta radiación.

Por ejemplo, en medicina, el diamante CVD debería ser ideal para aplicaciones de terapia de hadrones (como la dosimetría), en vista de los altos gradientes de radiación encontrados y particularmente su equivalencia tisular, aliviando la necesidad de correcciones de dosis.

4.2 Materiales del grupo III – V

Estos son compuestos que combinan un anión del grupo V (de nitrógeno o inferior) y un catión del grupo III (generalmente, Al, Ga o In). Cada átomo del grupo III está unido a cuatro átomos del grupo V y viceversa, de modo que cada átomo tiene una banda de valencia llena (8 electrones). Esta ionicidad provoca cambios significativos en las propiedades semiconductoras. Por ejemplo, aumenta la atracción de Coulomb entre los iones y la banda prohibida.

Arseniuro de galio

El arseniuro de galio (GaAs) es un material directo de banda III-V con una estructura reticular cúbica simple. Es ampliamente utilizado en la fabricación de diodos emisores de luz roja (LED), ventanas infrarrojas y diodos láser. En comparación con muchos semiconductores, tiene una serie de atributos atractivos. Por ejemplo, su densidad ($5,32 \text{ g cm}^{-3}$) es más del doble que la del Si y, por lo tanto, tiene una mejor potencia de frenado, especialmente en el rango de energía de rayos X duros. Su banda prohibida (1.43 eV) es lo suficientemente amplia como para permitir la operación a temperatura ambiente, pero lo suficientemente pequeña como para que su resolución espectroscópica limitada por Fano sea cercana a la del Si. Su movilidad de electrones ($8500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) es aproximadamente un factor 6 mayor que Si, lo que permite un funcionamiento más rápido, mientras que su resistividad aparente ($> 10^3 \Omega \text{ cm}$) es mucho mayor que Si, lo que permite

utilizar campos más altos para la carga colección, que a su vez permite fabricar dispositivos más gruesos.

El alto número atómico de este material lo hace atractivo para la detección de rayos X, y su alta movilidad de electrones lo convierte en un material más rápido que el silicio. Si bien tiene una eficiencia de absorción de rayos X más baja que CdTe a energías superiores a 50 keV, a alrededor de 30 keV, tiene la ventaja de que la fluorescencia no la afecta tan fuertemente.

Desde el punto de vista de la fabricación, los dispositivos fabricados con material semi-aislante pueden aislarse por sí mismos y, por lo tanto, GaAs es ideal para la fabricación de circuitos integrados y las técnicas de replicación. A diferencia de la mayoría de los compuestos II-VI que se cultivan específicamente para detectores de radiación, los GaAs semi-aislantes a granel se producen principalmente para sustratos para la industria electrónica.

A pesar de varias ventajas de los sensores de silicio en la detección de partículas nucleares, rayos X y radiación gamma (resolución de alta energía de ~ 10 keV y bajo nivel de pérdida integral de ~ 2 keV), el interés de los diseñadores de detectores de las partículas nucleares en los sensores de GaAs son estimuladas por su relativamente alta radiación y estabilidad térmica y alta sensibilidad a los rayos X y la radiación gamma (debido a una masa atómica relativamente alta).

Una movilidad de electrones relativamente alta en presencia de campos débiles se debe a una masa efectiva pequeña. En presencia de campos débiles, a una temperatura de $T = 300$ K, la movilidad de electrones (aproximadamente $8000 \text{ cm}^2/\text{V s}$) es siete veces mayor que la movilidad en silicio. Esta circunstancia proporciona una tasa de trabajo ultra alta de los circuitos integrados de GaAs. La dispersión por fonones ópticos polares es el principal efecto de dispersión en los GaAs puros. A una temperatura de 77 K, la movilidad de los electrones está determinada predominantemente por la dispersión por iones de la impureza de fondo y asciende a $(8-25) \times 10^3 \text{ cm}^2 / \text{V s}$. La alta movilidad de electrones permite construir dispositivos GaAs rápidos, y el sustrato dieléctrico proporciona capacidades parásitas relativamente bajas en los circuitos integrados.

Fosfuro de galio

El fosfuro de galio (GaP) es un semiconductor indirecto de banda ancha (2.26 eV) con una estructura cristalina cúbica (mezcla de zinc). Su densidad es de 4.1 g cm^{-3} , intermedia entre Si y Ge. Hay muy poca información disponible sobre sus propiedades de transporte. Originalmente se investigó como material óptico y para aplicaciones de componentes a alta temperatura. Sin

embargo, su uso principal desde la década de 1960 ha sido en la fabricación de diodos emisores de luz roja, naranja y verde de brillo bajo y estándar, y los diversos colores se logran mediante dopaje. En una etapa temprana se identificó como un posible candidato para la detección de rayos gamma a temperatura ambiente.

Nitruro de galio

Aunque los avances en la tecnología de crecimiento han llevado a la realización del crecimiento epitaxial de las capas de nitruro de galio (GaN), las heteroestructuras y los nanocristalinos, su desarrollo futuro está actualmente limitado por la falta de un sustrato adaptado enrejado adecuado. Hasta hace poco, gran parte del trabajo se centraba en aplicaciones optoelectrónicas, porque solo GaN, en virtud de su banda prohibida directa, puede emitir eficientemente en la región azul del espectro, haciendo posible la generación de luz blanca en estado sólido. por ejemplo, GaAs y Si, particularmente a frecuencias de microondas, así como varios beneficios a nivel de sistema. Estos incluyen tamaño compacto, alta relación potencia / masa, menores pérdidas del combinador, altos anchos de banda, gestión térmica facilitada y robustez. Las propiedades físicas de GaN, como su banda ancha (3,39 eV), alta densidad ($6,15 \text{ g cm}^{-3}$), gran energía de desplazamiento ($\sim 20 \text{ eV}$) y estabilidad térmica, lo convierten en un candidato ideal como medio de detección de rayos X y partículas duras a altas temperaturas y radiación.

Fosfuro de indio

El fosfuro de indio (InP) se usa ampliamente en aplicaciones optoelectrónicas y microelectrónicas de alta velocidad e incluso se ha propuesto como un detector de neutrinos debido a la gran sección transversal de captura de neutrinos en el indio. Tiene una de las movilidades de electrones más altas de cualquier material semiconductor (~ 3 veces la del silicio, es decir, $4600 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$), lo que la hace particularmente adecuada para aplicaciones donde es deseable una operación de alta velocidad de conteo. Su intervalo de banda de 1.35 eV implica que los detectores deben funcionar a temperatura ambiente con una resolución espectroscópica Fano limitada cercana a la de Si, y su densidad relativamente grande (aproximadamente el doble que la del Si) garantiza una alta eficiencia de detección de rayos X por encima de 10 keV.

De hecho, solo recientemente ha sido posible resolver picos de fotones con claridad en las longitudes de onda de rayos X y rayos gamma. La principal dificultad en la fabricación de

detectores de radiación está relacionada con la formación de un sistema de electrodos óhmicos, debido a una alta concentración de estados de superficie y la alta reactividad química de la superficie libre de InP.

Se descubrió que respondían a los rayos X a temperatura ambiente pero no eran espectroscópicos. Aunque se encontró una mejora significativa en la CCE utilizando material SI co-dopado con Mn-Ti (91% para 5.5. Partículas alfa de MeV a 230 K), no se pudo medir una respuesta de rayos X o rayos gamma debido a un alto nivel del sistema ruido.

Yoduro de indio

El yoduro de indio (InI) es un cristal ortorrómbico centrado en la base de banda ancha, con una estructura en capas. Tiene un punto de fusión relativamente bajo (351 °C) y no presenta transición de fase sólida entre su punto de fusión y temperatura ambiente. Su intervalo de banda es de 2.0 eV, lo que ofrece la posibilidad de un funcionamiento silencioso a temperatura ambiente y superior. El dispositivo mostró una respuesta clara, pero no totalmente espectroscópica, a los rayos X de 22 keV de una fuente radiactiva de ^{109}Cd a temperatura ambiente. Se encontró que las características de voltaje de corriente eran lineales en polaridad de los voltajes aplicados, con resistividades de $2 \times 10^9 \Omega \text{ cm}$ para los materiales de partida refinados por zona y $1 \times 10^8 \Omega \text{ cm}$ para los materiales de partida sintetizados con vapor, respectivamente.

4.2.1 Materiales de brecha estrecha

En las longitudes de onda de rayos X y rayos gamma, varios materiales de banda estrecha han atraído la atención como posibles reemplazos para Si y Ge. Estos materiales, en particular, InAs e InSb, ofrecen la posibilidad de una resolución espectral más allá de la de los semiconductores elementales, más cerca de los superconductores de alta temperatura, a pesar de la desventaja de requerir temperaturas de funcionamiento sustancialmente más bajas.

Potencialmente, InAs puede alcanzar el doble de la resolución energética del silicio e InSb tres veces. Además, ambos tienen una movilidad de electrones muy alta, lo que permite una operación de baja polarización, y ambos ya se usan ampliamente en la industria de semiconductores. Desde el punto de vista del detector, tanto InSb como HgCdTe se han utilizado con éxito para planos focales infrarrojos.

Arseniuro de indio

El arseniuro de indio o monoarsenuro de indio (InAs) es un material de banda prohibida directa con una estructura cristalina cúbica, una banda prohibida de 0.35 eV, una movilidad de electrones de $\sim 33,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y una densidad de 4.68 g cm^{-3} . Se ha usado convencionalmente en detectores de infrarrojos. Se puede esperar que exceda el de Si en un factor de dos en virtud de su baja banda prohibida de detección en el rango de longitud de onda de 1 a $3.8 \mu\text{m}$ y para producir láseres de diodo infrarrojo para aplicaciones de telecomunicaciones. Teóricamente, la resolución energética de los detectores de rayos X basados en InAs se puede esperar que exceda el de Si en un factor de dos en virtud de su bajo intervalo de banda. Típicamente, las corrientes de fuga inversa eran del orden de unos pocos mA a temperatura de nitrógeno líquido. Se encontró que el dispositivo era sensible pero no espectroscópico a las partículas alfa de 5.51 MeV.

Antimoniuro de indio

Al igual que InAs, el antimonuro de indio (InSb) se usa comúnmente para fabricar detectores infrarrojos que son sensibles en el rango de longitud de onda de 1 a $5 \mu\text{m}$. Todos los anteriores son atributos muy atractivos para un posible detector de radiación de alta resolución. Aunque inicialmente fue sugerido como un medio de detección de rayos X por Harris en 1986, se ha realizado muy poco trabajo hasta hace poco. El detector fue espectroscópico para partículas alfa con una resolución de energía FWHM medida del 3,1% a 5,5 MeV. El dispositivo también mostró una respuesta a los rayos gamma de una fuente radiactiva ^{133}Ba .

4.3 Materiales del grupo II – VI

Los materiales del Grupo II – VI han atraído mucha atención debido a la amplia gama de compuestos disponibles y la posibilidad de diseñar la banda en un rango casi continuo. Estos son compuestos que combinan un metal del grupo IIb (como Zn, Cd y Hg, en los períodos 3, 4 y 5, respectivamente) con un catión del grupo VIa. Una motivación importante para el desarrollo de semiconductores II – VI es su amplia gama de bandgaps (desde 0.15 eV para HgTe a 4.4 eV para MgS), Z altamente efectiva y la capacidad de hacer heteroestructuras desarrolladas con MBE y MOCVD, de la misma manera que para sistemas III – V.

Telururo de cadmio

El telururo de cadmio (CdTe) fue uno de los primeros semiconductores compuestos que se sintetizó a fines del siglo XIX. Sin embargo, hasta la década de 1940 su único uso fue como pigmento, con lo cual se utilizó en la producción de fotocélulas. Los grandes números atómicos de sus átomos constituyentes ($Z_{\text{Cd}} = 48$, $Z_{\text{Te}} = 52$) aseguran un alto poder de detención y, por lo tanto, alta eficiencia cuántica, en comparación con Si y Ge. Por ejemplo, en términos de eficiencia, 2 mm de CdTe equivalen a 10 mm de Ge para la detección de rayos gamma. Desde finales de la década de 1960, CdTe también se ha considerado como un material semiconductor prometedor para la detección de rayos X y rayos gamma en condiciones de movilidad relativamente alta ($\mu_n \sim 10^3 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y $\mu_p \sim 100 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) y alto poder de frenado.

Dado que es un material más frágil que el GaAs y el silicio, el riesgo de dañar el material durante la unión por golpes es mayor. El mayor beneficio de CdTe es que tiene una eficiencia cuántica sustancialmente mayor (mayor a energías más altas). lo que lo convierte en una opción para experimentos a 80 keV y superiores.

Telururo de zinc y cadmio

El telururo de cadmio y zinc (denotado de diversas maneras por CZT, CdZnTe, (Cd, Zn) Te o $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Te}$) es un compuesto pseudoternario que se ha estudiado ampliamente en las longitudes de onda de rayos X y rayos gamma y es probablemente el semiconductor compuesto más utilizado. CdTe fue originalmente el foco del estudio experimental en la década de 1960, hasta que se descubrió que la adición de un pequeño porcentaje de zinc a la masa fundida da como resultado un aumento de la banda prohibida, así como la energía de la formación de defectos y la eliminación virtual de la polarización, efectos normalmente asociados con CdTe.

Si bien un aumento en E_g aumenta el ruido de Fano debido a las estadísticas de generación del operador, al mismo tiempo reduce el ruido de disparo debido a las corrientes de fuga térmica. Aunque las corrientes de fuga son lo suficientemente bajas como para permitir el funcionamiento a temperatura ambiente, se puede ver que hay una mejora notable en ambas funciones de resolución con solo una modesta reducción de temperatura. De hecho, la resolución energética mejora en un factor de tres con una reducción de temperatura de solo 20°C, en comparación con la medida a temperatura ambiente.

El producto de movilidad de por vida ($\mu \times \tau$) se considera una de las figuras fundamentales de mérito para un espectrómetro de rayos X o rayos gamma semiconductores. La movilidad de electrones ($\mu_e = 1,000\text{--}800 \text{ cm}^2 / \text{V s}$) y la vida útil ($\tau_e = 1\text{--}5 \times 10^{-6} \text{ s}$) son relativamente altas, pero la movilidad del agujero ($\mu_h = 80\text{--}30 \text{ cm}^2 / \text{V s}$) y la vida útil ($\tau_h = 10^{-6} \text{ a } 10^{-7} \text{ s}$) son típicamente muy bajos en CZT. [17,18] Las movilidades de electrones hacen que presenten el mismo problema que la mayoría de los semiconductores y que las cámaras de ionización: la recolección incompleta de carga.

Telururo de cadmio y manganeso

El telururo de cadmio manganeso compuesto pseudoternario (generalmente denotado por CMT, CdMnTe , $(\text{Cd}, \text{Mn}) \text{Te}$ o $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Mn}_x\text{Te}$) es un material magneto-óptico con propiedades espintrónicas que ha encontrado aplicación en la fabricación de Faraday rotadores, aisladores ópticos y sensores de campo magnético. Se ha utilizado tradicionalmente en la producción de LED, células solares y láser sintonizable visible a infrarrojo medio y se ha propuesto como medio de detección de radiación.

Más recientemente, ha llamado la atención como una alternativa económica para CdZnTe , ya que es más fácil de producir, porque CdZnTe solo se puede cultivar de manera confiable usando Bridgman de alta presión (HPB), que es complejo y costoso. En la actualidad, CdMnTe sufre varios problemas materiales importantes. Primero, es difícil de sintetizar debido a la alta reactividad de Mn, que tiende a unirse con los óxidos residuales en la superficie del recipiente. En segundo lugar, en comparación con CdZnTe , la ionicidad de enlace de CdMnTe es mayor, lo que resulta en una tendencia a cristalizar en la forma hexagonal, o a producir un alto grado de hermanamiento en la modificación de la mezcla de zinc. En tercer lugar, la resistividad de los cristales de CdMnTe "en crecimiento" puede ser bastante baja ($<10^3 \Omega \text{ cm}$) debido a una alta concentración de vacantes de cadmio que invariablemente resultan del crecimiento de Bridgman.

Selenuro de Cadmio

El selenuro de cadmio (CdSe) cristaliza en una estructura hexagonal muy compacta a 1239°C , lo que contribuye a sus coeficientes de atenuación de fotones relativamente altos en longitudes de onda de rayos X duros. Estos son comparables a CdTe a pesar de una Z efectiva y una densidad más bajas (5.8 g cm^{-3}). Su intervalo de banda es de 1.73 eV , que debería ser lo suficientemente alto

como para permitir el funcionamiento a temperatura ambiente, y su movilidad de electrones y huecos ($720 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y $75 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, respectivamente) se encuentran entre los compuestos más altos del grupo II-VI.

Se descubrió que los detectores terminados respondían a los fotones de rayos X en el rango de energía de 10 keV a 660 keV, aunque las resoluciones de energía eran pobres. Por ejemplo, a una resolución de 60 keV fue de 45 keV (75%) FWHM.

Selenuro de cadmio y zinc

El selenuro de cadmio y zinc ($\text{Cd}_{0.7} \text{Zn}_{0.3} \text{Se}$) tiene un intervalo de banda de 1.73 eV a 2.67 eV y una densidad de 5.4 a 5.8 g cm^{-3} , dependiendo de la fracción de zinc. Al igual que con la adición de Zn a CdTe, la adición de Zn al sistema CdSe también da como resultado un intervalo de banda más alto, lo que permite la fabricación de detectores con corrientes de fuga más bajas y ruido suficientemente bajo para detectar fotones de rayos X. Se midieron resoluciones de energía FWHM medidas de 1,8 keV a 5,9 keV y 4 keV a 27 keV para un dispositivo de 0,45 mm de espesor.

Selenuro de telururo de cadmio

Se denomina de varias maneras como $\text{Cd}_x\text{Te}_{(1-x)}\text{Se}$ (o CdTeSe , $\text{Cd}(\text{Te}, \text{Se})$) es visto como una alternativa atractiva a CdZnTe , porque la energía de enlace del sistema CdSe es 1.3 veces mayor que el sistema CdTe correspondiente, y la red reticular constante 0.9 veces más corto. Según las mediciones de I/V y Hall, se encontró que la resistividad del material era de $5 \times 10^9 \Omega \text{ cm}$, y la movilidad de electrones y huecos era de 59 y $33 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Los autores atribuyen este pobre resultado a las altas corrientes de fuga que limitaron el sesgo aplicado a 100 V, lo que a su vez condujo a una baja eficiencia en la recolección de carga. [17]

Selenuro de zinc

Es un semiconductor de banda prohibida directa con una brecha de energía de 2.7 eV a temperatura ambiente y una densidad de 5.3 g cm^{-3} . Es un material interesante por varias razones. Primero, su constante de red es 5.667 Å , que es casi la misma que la de GaAs. Esto hace posible el crecimiento epitaxial. También es uno de los pocos compuestos del grupo II-VI para los que están disponibles materiales de tipo n y p, lo que ha abierto nuevas vías en aplicaciones optoelectrónicas,

como la producción de LED azules y diodos láser. Para aplicaciones de detectores de radiación, ZnSe se ha explorado como una alternativa de alta temperatura a CdTe y CdZnTe, porque la operación práctica de los detectores CdTe y CdZnTe está limitada a $\sim 70^\circ\text{C}$ antes de que se produzca un daño irreversible. Del mismo modo, las temperaturas máximas de almacenamiento son de alrededor de 100°C . ZnSe, en virtud de su gran banda prohibida (2.7 eV en comparación con 1.47 eV para CdTe y 2.0 eV para CdZnTe), debe operar a temperaturas mucho más altas, hasta $\sim 200^\circ\text{C}$.

4.4 Materiales del grupo III – VI

La mayoría de los compuestos III-VI son calcogenuros, que cristalizan en estructuras de tipo capa. La unión es predominantemente covalente dentro de las capas, pero mucho más débil van der Waals entre capas. Estos materiales son interesantes porque el comportamiento de los electrones dentro de las capas es casi bidimensional (Q2D). Los ejemplos semiconductores de este grupo se limitan actualmente a los calcogenuros a base de galio e indio, GaS, GaSe, GaTe, InS, InSe e InTe, de los cuales GaSe y GaTe han mostrado respuestas a la radiación alfa y gamma.

Selenio de galio

Históricamente, el selenio de galio (GaSe) fue de interés debido a sus propiedades de fotoconducción y luminiscencia. Sin embargo, investigaciones recientes se han centrado en la generación y detección de radiación de terahercios sintonizables de banda ancha (THz) mediante la explotación de las propiedades altamente anisotrópicas de su estructura en capas. Las muestras fueron generalmente de tipo n, con resistividades de temperatura ambiente en el rango de 10^8 a $10^9 \Omega\text{ cm}$. Se descubrió que los detectores eran sensibles a las partículas α , con resoluciones de energía espectroscópica medidas tan bajas como 6.8% FWHM a 5.5 MeV. Castellano exploró la posibilidad de utilizar GaSe para dosimetría de rayos X. En esta aplicación, los detectores GaSe se utilizaron como dispositivos de fotoconducción midiendo la corriente continua inducida por altos flujos de rayos X de 130 kV y 170 kV. Mandal et al lograron la detección de rayos X con material cultivado mediante la técnica vertical modificada de Bridgman.

Telururo de galio

El telururo de galio (GaTe) ha atraído un interés significativo de la industria electrónica, porque a diferencia de otros compuestos en este grupo (III y VI), los cristales individuales se pueden

cultivar con baja resistividad, lo que hace posible fabricar heterouniones con resistencia en serie insignificante. Recientemente, se ha realizado un esfuerzo para explorar GaTe como medio de detección de radiación, porque sus propiedades físicas y mecánicas son similares a las de GaSe y casi ideales.

4.5 Materiales del grupo n-VII

Los materiales del grupo n-VII (donde $n = \text{II, IV}$) generalmente pertenecen a la familia de yoduros y telururos de metales pesados estructurados en capas.

Yoduro mercurico

El yoduro mercurico (HgI_2) se ha investigado como un detector de rayos X y rayos gamma a temperatura ambiente desde principios de la década de 1970. Su banda ancha (2.1 eV) junto con los altos números atómicos (80 y 53) de sus átomos constituyentes lo convierten en un material atractivo para los rayos X a temperatura ambiente y particularmente los espectrómetros de rayos gamma. Las ventajas adicionales de este material son que se ha demostrado que funciona a temperaturas elevadas (55°C) con un impacto mínimo en el rendimiento espectral, y es extremadamente resistente a la radiación, al menos a una fluencia total de protones de $\sim 3 \times 10^{11}$ partículas cm^{-2}).

Bromoyoduro de mercurio

Se han explorado haluros mixtos de mercurio (HgXY) como posibles alternativas a HgI_2 . Aunque HgI_2 tiene muchas propiedades deseables (alta densidad, banda ancha amplia, etc.), la presencia de una transición de fase sólida-sólida destructiva a baja temperatura dificulta el crecimiento de cristales homogéneos grandes. Cuando se combina con su gran densidad (6.2 g cm^{-3}) y su alta resistividad ($\sim 10^{12} \Omega \text{ cm}$), es un candidato ideal para aplicaciones de detectores de rayos X y rayos gamma duros a temperatura ambiente.

Bromuro de talio

Para aplicaciones de rayos X y rayos gamma duros a temperatura ambiente, el bromuro de talio se ha convertido en un material particularmente interesante en vista de su amplio intervalo de banda (2,5 veces mayor que el del Si) y sus altos números atómicos ($\text{Tl} = 81$, $\text{Br} = 35$) de sus átomos constituyentes. Además, su densidad ($7,5 \text{ g cm}^{-3}$) es comparable a la del germenato de bismuto

(BGO) y, por lo tanto, tiene un excelente poder de detención para rayos X y rayos gamma duros. La relativa suavidad de TlBr puede causar problemas importantes durante la fabricación del detector porque cualquier procesamiento mecánico, como lapeado y pulido, puede crear una cantidad excesiva de daños, principalmente en forma de dislocaciones orientadas paralelamente a la superficie que se procesa. Los primeros detectores de TlBr solo podían funcionar a temperaturas reducidas debido a imperfecciones estequiométricas y cristalográficas causadas principalmente por impurezas intersticiales.

Bromoyoduro de talio

Si bien el bromoyoduro de talio (TlBr) tiene muchas propiedades deseables (como alta densidad y banda ancha), su suavidad mecánica no se presta al crecimiento de grandes cristales homogéneos, ni al procesamiento mecánico requerido en la fabricación de detectores. Además, la reproducibilidad de los resultados sigue siendo un problema importante debido a problemas de estabilidad y polarización. En vista de estas limitaciones, ha habido un interés reciente en las sales de talio como posibles medios de detección de rayos gamma. De los compuestos disponibles, el bromoyoduro de talio ($\text{Tl}(\text{Br}, \text{I})$, $\text{TlBr}_x\text{I}_{1-x}$) parece ser el más prometedor. Cuando se combina con su gran densidad ($7,4 \text{ g cm}^{-3}$) y su alta resistividad ($\sim 10^{10} \Omega \text{ cm}$), es un candidato ideal para aplicaciones de detectores de rayos X y rayos gamma duros a temperatura ambiente. El bromoyoduro de talio, en la forma $\text{Tl Br}_{0,4} \text{I}_{0,6}$, se ha utilizado durante varias décadas para aplicaciones de espectroscopía infrarroja (IR).

Yoduro de plomo

Se ha considerado como un material adecuado para la detección de rayos X y rayos gamma desde la década de 1970 en vista de su alta densidad ($6,2 \text{ g cm}^{-3}$) y banda ancha (2,3 eV a 2,5 eV), lo que debería permitir que los detectores funcionen a, o incluso por encima de la temperatura ambiente. Desafortunadamente, en la actualidad, los productos de movilidad de por vida del portador son deficientes: del orden $\mu_e \tau_e = 1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}$ y $\mu_h \tau_h = 3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}$. Esto es aproximadamente un orden de magnitud menor que HgI_2 , lo que impide efectivamente la fabricación de detectores gruesos si se desea mantener el rendimiento espectral. Sin embargo, el alto número atómico de sus elementos ($Z_{\text{Pb}}=82$, $Z_{\text{I}}=53$) asegura una buena potencia de frenado en

la región de rayos X, y por lo tanto el grosor del detector se puede minimizar para una eficiencia de detección dada. Por ejemplo, a 100 keV, el detector solo necesita ser ~ 1 mm de espesor para absorber el 90% de la radiación incidente. Por ejemplo, Lund et al, fabricaron detectores de radiación a partir de cristales crecidos por fusión. Los detectores exhibieron una buena resolución energética (915 eV FWHM a 5.9 keV a 20 ° C). Los resultados también indicaron que eran más estables que los detectores de HgI₂ y capaces de operar a temperaturas superiores a 100 ° C.

PbI₂ tiene una densidad y una potencia de frenado similares a las de HgI₂, pero su producto de $\mu\tau$ de electrones disminuye en un factor de $\sim 1/30$. Sin embargo, tiene varias ventajas. Su banda prohibida es ligeramente más alta, tiene una presión de vapor más baja a temperatura ambiente y no tiene el cambio destructivo de fase sólida entre el punto de fusión y la temperatura ambiente que tiene HgI₂. Aunque los detectores de partículas habían sido fabricados, su uso como detectores de rayos X solo fue utilizado por el grupo de Radiation Monitoring Devices (RMD) alrededor de 1987.

Triyoduro de bismuto

El triyoduro de bismuto (BiI₃) es un semiconductor de banda prohibida directa de alta densidad (5.8 g cm⁻³) con una banda prohibida de 1.7 eV. se ha propuesto como detección de rayos gamma medio. Las mediciones de conductividad eléctrica indicaron una resistividad de $2 \times 10^9 \Omega$ cm, aunque no se detectó respuesta de partículas alfa o rayos gamma. Las resistividades medidas fueron de hasta $2 \times 10^{12} \Omega$ cm y, a diferencia del trabajo anterior, los pequeños detectores de espesor que oscilaban entre 50 y 80 μ m mostraron una respuesta a los rayos gamma de 60 keV.

4.6 Compuestos ternarios

Aparte de las aleaciones pseudoternarias de la forma AB_xC_{1-x} (por ejemplo, Cd_{1-x}Zn_xTe), se ha realizado muy poco trabajo en materiales ternarios verdaderos, como A^{II}B^{IV}C₂^V o A₂^{II}B^VC^{VII}, principalmente debido a dificultades para mantener la homogeneidad composicional durante el crecimiento. Como regla, los compuestos ternarios basados en los elementos metálicos más pesados (como Hg y Bi) tienen menor resistencia mecánica, peor fase y estabilidad química que sus derivados binarios.

Yoduro de plomo y talio

El compuesto ternario, TlPbI_3 , ha sido investigado como un medio de detección de rayos X y rayos gamma a temperatura ambiente, en vista de su alta Z, alta densidad (6.6 g cm^{-3}) y banda prohibida de 2.3 eV. Se fabricó un detector aplicando grafito coloidal en las superficies superior e inferior del disco. La resistividad medida fue de $2.5 \times 10^{12} \Omega \text{cm}$. Si bien el dispositivo proporcionó una respuesta de fotoconductividad medible cuando se expuso a un tubo de rayos X, no se informaron mediciones utilizando fuentes de partículas alfa o rayos gamma.

Calcohaluros de talio

Recientemente Johnsen et al. han propuesto investigar una serie de semiconductores basados en calcohaluro de talio, a saber, TlGaSe_2 , Tl_6SeI_4 y $\text{Tl}_2\text{Au}_4\text{Se}$. Sus principales ventajas sobre los haluros de metales pesados, como HgI_2 , TlBr , PbI_2 y BiI_3 es que tienden a tener densidades más altas, productos $\mu\tau$ más grandes y son mecánicamente más fuertes (generalmente de 3 a 6 veces más duros). La última calidad es particularmente importante para la fabricación de detectores, ya que cualquier procesamiento mecánico introduce defectos en los materiales blandos. Dos compuestos en particular han mostrado resultados prometedores, TlGaSe_2 y $\text{Tl}_6\text{I}_4\text{Se}$.

Seleniuro de talio y galio

El seleniuro de talio y galio (TlGaSe_2) se funde congruentemente a 350°C y cristaliza en una estructura tipo capa. A partir de las mediciones de I/V , la resistividad se estimó en $\sim 10^9 \Omega \text{cm}$. Los productos de movilidad de por vida se determinaron a partir de mediciones de fotoconductividad para ser $\mu_{\text{re}} = 6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1}$ para electrones y $\mu_{\text{th}} = 9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1}$ para agujeros. La respuesta de rayos X del dispositivo se investigó utilizando un tubo de rayos X Ag. Las mediciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente con un sesgo operativo de 190V. Aunque el dispositivo era espectroscópico, resolviendo la línea $K\alpha$ característica a 22,2 keV, la línea $K\beta$ a 24,9 keV no se resolvió.

Seleniuro de yoduro de talio

El seleniuro de yoduro de talio ($\text{Tl}_6\text{I}_4\text{Se}$) es un material de separación directa con un intervalo de banda de 1.86 eV. A partir de las mediciones de I/V , se encontró que la resistividad era $4 \times 10^{12} \Omega \text{cm}$ a lo largo de la dirección cristalográfica $\langle 001 \rangle$. Los productos de movilidad y vida útil se

determinaron a partir de mediciones de fotoconductividad y se encontraron comparables a CdZnTe para electrones ($\mu\tau_e = 7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1}$) y un orden de magnitud mayor para agujeros ($\mu\tau_h = 6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1}$).

Principales propiedades de los materiales semiconductores candidatos para la fabricación de detectores de radiación:

	GaAs	GaN	CdZnTe	HgI₂	Si
Numero atómico (Z)	31, 33	31, 7	48, 30, 52	80, 53	14
Densidad (g /cm³)	5.32	6.15	5.81	6.40	2.3
Gap (eV)	1.43	3.4	1.45– 1.65	2.13	1.12
Movilidad de electrones (cm² v⁻¹ s⁻¹)	8500	1500	-	100	1350
($\mu\tau$)e	8×10^{-5}	-	4×10^{-3}	3×10^{-4}	>1
($\mu\tau$)h	4×10^{-6}	-	1.2×10^{-4}	1×10^{-5}	>1
Creación de pares e-h (eV)	4.3	-	4.4 - 4.7	-	3.6
Conductividad térmica (W/ cm °C)	0.46	-	2.67×10^{-4}	-	1.5
Campo eléctrico de ruptura (v/cm)	-4×10^5	3.3×10^6	-	-	-3×10^5
Resistividad (Ω cm)	10^{10}	-	10^{11}	10^{12}	$< 10^4$

Tabla 2. Características de algunos materiales semiconductores

La temperatura operativa en todos los casos es de 300K

Donde $\mu\tau$ es el producto de movilidad de por vida.

4.7 Elección del material semiconductor óptimo para la detección de rayos X

Como se había mencionado anteriormente existen muchos materiales semiconductores, cada uno de ellos con propiedades para diferentes aplicaciones, Jim McKenzie de Laboratorios Chalk River, Bell y Sandia, en 1979, dijo: "Hay casi tantas recetas para hacer contadores de semiconductores como cristales de silicio y germanio o, al menos, instalaciones de fabricación de detectores" se refería a las variaciones en el proceso básico, y agregaríamos ahora que cada 'instalación de fabricación de detectores' probablemente tiene más de un proceso que utilizan. Aunque existan tantas posibles combinaciones no solo de materiales, sino de métodos de fabricación, desafortunadamente, el material detector ideal no existe, ya que las cualidades deseables a menudo están en desacuerdo. Por ejemplo, aumentar el rendimiento de carga requiere un intervalo de banda más pequeño, lo que aumenta la corriente de polarización inversa. Otra consideración es la constante dieléctrica, que afecta la capacitancia y, por lo tanto, el ruido electrónico.

Gracias a toda la bibliografía existente sobre materiales semiconductores se pudieron estudiar las diferentes propiedades físicas de una gran variedad de materiales que se destacaban por su tolerancia a la radiación y otras propiedades que los convertían en materiales atractivos para la detección de radiación ionizante, especialmente el en rango de los rayos X y rayos γ .

4.7.1 Requisitos generales sobre el material del detector

En términos de requisitos generales, Z debe ser mayor que 40 para producir un alto poder de frenado. Estructuralmente, la red debe tener una geometría compacta (como una estructura cúbica centrada en la cara) para optimizar la densidad. El material debe tener una constante dieléctrica baja, para garantizar una baja capacitancia y, por lo tanto, ruido del sistema. Los criterios de selección pueden extenderse aún más para excluir la mayoría de los compuestos II-VI en vista de su propensión a los efectos de toxicidad, atrapamiento profundo y polarización, junto con sus bajos puntos de fusión. Esto último dificulta la realización del recocido térmico requerido para activar los dopantes implantados.

Desde un punto de vista electrónico, el material debe tener una banda prohibida indirecta para limitar los procesos de recombinación radiactiva. A temperatura ambiente la corriente debida a la producción térmica de pares puede enmascarar la corriente debida a la radiación. Para evitar esto es necesario emplear semiconductores con un gap suficientemente ancho. Por otra parte, la energía

promedio necesaria para crear un par electrón-hueco, ϵ , está relacionada con la energía del gap [Klein 1968]. Cuanto menor sea el gap más fácil será crear un par electrón-hueco. Con el objetivo de conseguir un mayor número de portadores y por tanto una mejor resolución energética es preferible que el gap sea pequeño. Para resolver este compromiso entre operabilidad a temperatura ambiente y alta producción de pares de portadores, se buscan materiales cuyo gap sea mayor de 1.5eV y la energía necesaria para crear un par electrón-hueco menor de 5eV.

Basándose en toda esta información y los diferentes análisis que se realizaron sobre estos materiales se pudieron escoger 5 candidatos (tabla 2) que contaban con las características principales para ser detectores de radiación en el rango de los rayos X a una temperatura ambiente.

Para escoger estos candidatos y finalmente seleccionar el material que creemos óptimo se tuvieron en cuenta los requisitos generales sobre el material del detector y algunas propiedades como lo son:

- La conductividad térmica que es importante para producir dispositivos semiconductores térmicamente estables o de alta potencia.
- El campo eléctrico de ruptura máxima que cuando es alto se pueden aplicar sesgos mucho más altos, lo que resulta en velocidades de deriva más altas y una recolección de carga más eficiente.
- Una alta energía umbral de desplazamiento, que garantiza una alta tolerancia a la radiación.
- Una banda ancha grande significa que las corrientes oscuras son extremadamente bajas, lo que en principio debería permitir el funcionamiento a alta temperatura.
- Una alta densidad, más del doble del Si (2.3 g/cm^3), tiene una mejor potencia de frenado, especialmente en el rango de energía de rayos X duros.
- Una banda prohibida amplia permite la operación a temperatura ambiente o superior.
- Una alta movilidad de electrones permite un funcionamiento más rápido.
- Una alta resistividad aparente permite fabricar dispositivos más gruesos.
- Los grandes números atómicos de los átomos constituyentes aseguran un alto poder de detención y, por lo tanto, alta eficiencia cuántica.
- Un intervalo de banda alto permite la fabricación de detectores con corrientes de fuga más bajas y ruido suficientemente bajo para detectar fotones de rayos X.

Revisando cuidadosamente estas propiedades y la amplia información encontrada acerca de estos materiales, resumida de la sección 3.1 a la 3.6, teniendo en cuenta que no existe un semiconductor perfecto, se definió que el material que cumplía con más de las propiedades necesarias para detectar en un rango de energía amplio de rayos X (eV -keV), a temperatura ambiente, sin muchas dificultades en la fabricación, comercialmente aceptado y sin muchas pérdidas en la detección de energía es el arseniuro de galio (GaAs) o telururo de cadmio y zinc (CZT).

5. DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES PARA LA DETECCIÓN DE RADIACIÓN

Las estructuras descritas en esta sección forman la base para la electrónica de semiconductores, así como para los detectores. Un conocimiento de su funcionamiento y propiedades es un requisito previo para comprender los detectores de semiconductores.

5.1 Fotodiodo de avalancha

Los fotodiodos de avalancha son diodos con un mecanismo de ganancia interna. Como en el caso de los diodos estándar, los fotones generan pares de electrones, que son acelerados por el voltaje externo aplicado de manera que se introducen electrones adicionales en la banda de conducción por medio de la ionización por impacto. Estos electrones secundarios a su vez pueden absorber suficiente energía para elevar más electrones a la banda de conducción. Por lo tanto, se puede lograr un factor de multiplicación de varios cientos. Los diodos de avalancha generalmente se emplean en el caso de muy bajas intensidades de señal óptica, pero también se utilizan para aplicaciones con altas frecuencias de modulación. A partir de frecuencias de aprox. 60 MHz, el nivel de ruido aumentado por el efecto de avalancha es generalmente más bajo que el producido por un diodo convencional en combinación con amplificación electrónica externa. Las aplicaciones típicas incluyen medición de distancia a bajos niveles de señal y comunicación óptica.

Los fotodiodos de avalancha, por lo tanto, son más sensibles en comparación con otros fotodiodos semiconductores. Si se necesita una ganancia muy alta (10^5 a 10^6), los detectores relacionados con los APD (diodos de avalancha de fotón único) se pueden usar y operar con un

voltaje inverso por encima del voltaje de ruptura de un APD típico. En este caso, el fotodetector necesita que su corriente de señal sea limitada y disminuya rápidamente.

Se han utilizado técnicas activas y pasivas de extinción de corriente para este propósito. Los SPAD que funcionan en este régimen de alta ganancia a veces se refieren al modo Geiger. Este modo es particularmente útil para la detección de un solo fotón, siempre que la tasa de eventos del recuento oscuro y la probabilidad de pulso posterior sean suficientemente bajas. Las nuevas aplicaciones incluyen tomografía por emisión de positrones y física de partículas. La aplicabilidad y utilidad APD depende de muchos parámetros. Dos de los factores más importantes son: eficiencia cuántica, que indica qué tan bien se absorben los fotones ópticos incidentes y luego se usan para generar portadores de carga primaria; y corriente de fuga total, que es la suma de la corriente oscura y la fotocorriente y el ruido. Los componentes electrónicos de ruido oscuro son series y ruido paralelo. El ruido en serie, que es el efecto del ruido de disparo, es básicamente proporcional a la capacitancia APD, mientras que el ruido paralelo está asociado con las fluctuaciones del volumen APD y las corrientes oscuras superficiales. Otra fuente de ruido es el factor de ruido en exceso, ENF. Es una corrección multiplicativa aplicada al ruido que describe el aumento en el ruido estadístico, específicamente el ruido de Poisson, debido al proceso de multiplicación. El ENF se define para cualquier dispositivo, como tubos fotomultiplicadores, fotomultiplicadores de estado sólido de silicio y APD, que multiplica una señal, y en ocasiones se denomina "ruido de ganancia". El término de ruido para un APD también puede contener un factor de Fano, que es una corrección multiplicativa aplicada al ruido de Poisson asociado con la conversión de la energía depositada por una partícula cargada en los pares de electrones, que es la señal antes de la multiplicación. El factor de corrección describe la disminución en el ruido, en relación con las estadísticas de Poisson, debido a la uniformidad del proceso de conversión y la ausencia de estados de baño o de acoplamiento débil en el proceso de conversión. En otras palabras, un semiconductor "ideal" convertiría la energía de la partícula cargada en un número exacto y reproducible de pares de agujeros de electrones para conservar energía; en realidad, sin embargo, la energía depositada por la partícula cargada se divide en la generación de pares de huecos de electrones, la generación de sonido, la generación de calor y la generación de daño o desplazamiento. La existencia de estos otros canales introduce un proceso estocástico, donde la cantidad de energía depositada en un solo proceso varía de un evento a otro, incluso si la cantidad de energía depositada es la misma. La física subyacente asociada con el factor de ruido en exceso (ruido de ganancia) y el factor de Fano

(ruido de conversión) es muy diferente. Sin embargo, la aplicación de estos factores como correcciones multiplicativas al ruido de Poisson esperado es similar.

5.2 Fotodiodo de Schotky

Son uniones formadas por un metal y un semiconductor, y al igual que sucede en una unión $p-n$, cuando se pone en contacto el semiconductor y el metal se produce una distribución de carga que da lugar a una zona de transición en el semiconductor y a una barrera de potencial.

Estos fotodiodos pueden trabajar de dos formas:

- 1) Para energías de la radiación superiores a la banda prohibida del semiconductor, los pares son generados directamente en la zona de transición (p. e. uniones Pt-CdTe). El metal utilizado en la unión Schottky debe tener valores elevados de transmitancia y ser lo bastante delgado (del orden de 100 Å) como para permitir el paso de la radiación hasta la zona de transición. Adicionalmente se puede añadir un material antirreflejante en contacto con el metal con el objetivo de incrementar la eficacia cuántica.
- 2) Con energías de la radiación inferiores a la banda prohibida del semiconductor, pero superiores a la altura de la barrera de la unión, se generan electrones libres en el metal de la unión Schottky que atraviesan la barrera y generan pares electrón-hueco en la zona de transición del semiconductor (p. e. uniones Mo-Si).

En ambas formas, la selección de las características y propiedades del metal viene determinada por el tipo de radiación que se quiere detectar. [14]

La principal ventaja de los fotodiodos Schottky es que la conducción se efectúa por portadores mayoritarios, lo cual les da una respuesta muy rápida; además, debido a que la unión está situada prácticamente en la superficie del fotodiodo, el tiempo de tránsito de los portadores disminuye y se facilita su extracción. Como inconveniente tienen que su corriente de saturación es más grande que en los diodos de unión $p-n$, al tener una barrera inferior, haciéndolos más sensibles al ruido.

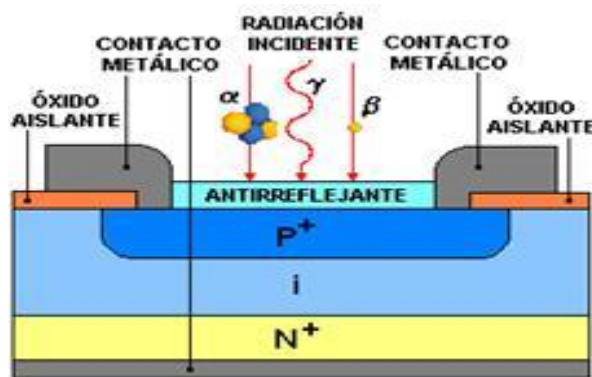


Figura 11. Estructura de un fotodiodo Schotky

Recuperado: Sensores de radiación nuclear con semiconductores.

5.3 Fotodiodo PIN

El fotodiodo PIN es un tipo de fotodetector, puede convertir señales ópticas en señales eléctricas. Esta tecnología fue inventada a finales de la década de 1950. Hay tres regiones en este tipo de diodo: región p, región intrínseca y región n. La región p y la región n están comparativamente muy dopadas que la región p y la región n de los diodos p-n habituales. El ancho de la región intrínseca debe ser mayor que el ancho de la carga espacial de una unión p-n normal. El fotodiodo PIN funciona con un voltaje de polarización inversa aplicado y cuando se aplica la polarización inversa, la región de carga espacial debe cubrir completamente la región intrínseca. Los pares de huecos de electrones se generan en la región de carga espacial por absorción de fotones. La velocidad de conmutación de la respuesta de frecuencia del fotodiodo es inversamente proporcional al tiempo de vida. La velocidad de conmutación se puede mejorar con una pequeña vida útil del operador minoritario. Para las aplicaciones de fotodetectores donde la velocidad de respuesta es importante, el ancho de la región de agotamiento debe ser lo más grande posible para la vida útil del portador de minorías pequeñas, como resultado, la velocidad del interruptor también aumenta. Esto se puede lograr con el fotodiodo PIN, ya que la inserción de la región intrínseca aumenta el ancho de carga espacial.

En los sensores de Si la anchura de la región intrínseca es de ~ 50 μm y el tiempo de respuesta es del orden de 50 ns, mientras que en los de CdTe o I₂Hg la región intrínseca puede ser mucho más estrecha, dado que la interacción de la radiación en estos materiales es mayor que en el Si, lo que permite tener tiempos de respuesta menores. Los fotodiodos PIN son muy adecuados en aquellas aplicaciones en las que se necesita una buena relación señal/ruido. [14]

El diagrama de un fotodiodo PIN normal se muestra a continuación.

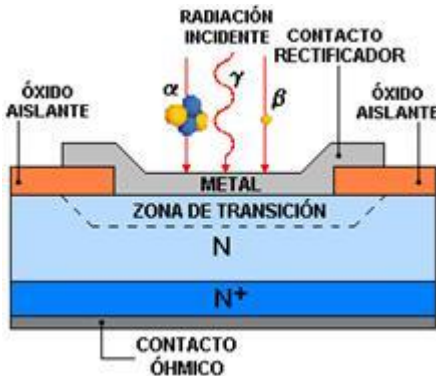


Figura 12. Estructura de un fotodiodo PIN

Recuperado de: Sensores de radiación nuclear con semiconductores.

La mayoría de los detectores de semiconductores de radiación son uniones p-n. La ventaja de la unión p-n es la construcción en el campo eléctrico en un límite entre los semiconductores de tipo p y n y la capacidad de recoger la carga de la mayor parte del material producido por la radiación ionizante debido a la difusión de electrones y agujeros a la región de la unión p-n. Este fenómeno es una base para el funcionamiento del diodo P-I-N en modo pasivo como un dosímetro de radiación ionizante. La cantidad de carga recolectada está determinada por la longitud de difusión de la minoría de portadores de carga o el tamaño de la base del detector que es grande. Teniendo en cuenta que se requiere una energía de 3.6 eV para la producción del par e-h (electrón- hueco) en silicio, es posible demostrar que la constante de generación de pares electrón-agujero para silicio es 4.2×10^{13} pares / cGycm³. Las mediciones de corriente a través del diodo proporcionarán la tasa de dosis y la integración de la dosis absorbida por corriente en silicio.

La respuesta del diodo en un modo actual es complicada y puede verse afectada por la tasa de dosis, la temperatura, los defectos de radiación y el material inicial. El cambio de la tasa de dosis de la radiación ionizante afecta el nivel de inyección y las propiedades de recombinación de la carga en una base de los detectores. La irradiación a largo plazo del diodo durante la aplicación en phantom o in vivo conduce a la acumulación de defectos de radiación y reduce la longitud de difusión y, como resultado, la sensibilidad del detector. El cambio de temperatura está afectando la actividad de recombinación y la respuesta del diodo. Todos estos factores hacen que los diodos sean dispositivos muy complicados para caracterizar la dosimetría de la radiación ionizante.

Los diodos juegan un papel importante en la dosimetría de radiación para las mediciones in vivo de las dosis de entrada y salida para la verificación del plan, así como la distribución de dosis en 2 D utilizando una matriz de diodos en IMRT. Tienen una buena resolución espacial de aproximadamente 1-2 mm y la aplicación principal es en dosimetría relativa para la verificación de dosis de profundidad y el perfil del haz en un espectro. A pesar de su pequeño tamaño, los diodos comerciales no pueden usarse para dosimetría de superficie debido a su acumulación para el equilibrio electrónico. [16]

5.4 Sensores de microbanda

Un detector de microbanda es un detector de partículas que consta de una gran cantidad de bandas semiconductoras idénticas dispuestas a lo largo de un eje de una estructura bidimensional, generalmente por litografía. El diseño geométrico de los componentes permite reconstruir con precisión la trayectoria de una partícula entrante de radiación ionizante. Los detectores de microbandas de silicio son un diseño común utilizado en varios experimentos. El mecanismo de detección consiste en la producción de pares de electrones en una capa de silicio de unos pocos cientos de micrómetros de espesor. Los electrones libres son desplazados por un campo eléctrico creado por un patrón de ánodos y cátodos interdigitados en la superficie del silicio y separados por un aislante de SiO₂.

No se puede hablar de estos sensores como de una nueva estructura, sino como un dispositivo que integra múltiples fotodiodos, al objeto de conseguir la detección de la radiación nuclear y su trayectoria de incidencia en el sensor (los hay de una y de dos coordenadas).

Para el caso de sensores 1-D, sobre la cara superior de un sustrato semiconductor ligeramente dopado de tipo n se procede a difundir tiras de tipo $p+$ (ánodos) y en la cara inferior se forma una región $n+$ (cátodo) común para todas las regiones $p+$.

Las uniones $p-n$ se polarizan inversamente, por lo que cuando una radiación nuclear incide sobre el sensor, los huecos generados en la zona de transición pasan a las microbandas más cercanas (región $p+$), mientras que los electrones son recogidos por la región $n+$. De esta forma se consigue que únicamente las microbandas más cercanas al punto donde se han generado los pares proporcionen señal, lo que da información sobre el punto de entrada de la radiación en el sensor [14].

Los sensores 2-D en lugar de tener una región $n+$ común, se les añade en su parte inferior tiras de tipo $n+$ en sentido ortogonal a las de tipo $p+$. Esto permite la extracción de los electrones y de los huecos por las microbandas más cercanas al punto de su generación.

La precisión de estos sensores depende principalmente de la distancia entre microbandas y por la forma en que se lee la señal que proporciona cada microbanda. La separación entre microbandas viene determinado por el tamaño de la nube de cargas que se forma en las proximidades de una microbanda. [14]

5.5 Dispositivos acoplados por carga

Un dispositivo acoplado a carga (CCD) es un dispositivo para el movimiento de carga eléctrica, generalmente desde dentro del dispositivo a un área donde se puede manipular la carga, como la conversión a un valor digital. Esto se logra "desplazando" las señales entre etapas dentro del dispositivo, una por una. Los CCD mueven la carga entre contenedores capacitivos en el dispositivo, y el cambio permite la transferencia de carga entre contenedores. CCD es una tecnología importante para imágenes digitales. En un sensor de imagen CCD, los píxeles están representados por condensadores (MOS) de semiconductores dopados de tipo p de óxido de metal. Estos condensadores MOS, los bloques de construcción básicos de un CCD están sesgados por encima del umbral de inversión cuando comienza la adquisición de imágenes, lo que permite la conversión de fotones entrantes en cargas de electrones en la interfaz de semiconductor-óxido; El CCD se utiliza para leer estas cargas. Aunque los CCD no son la única tecnología que permite la detección de luz, los sensores de imagen CCD se usan ampliamente en aplicaciones profesionales, médicas y científicas donde se requieren datos de imagen de alta calidad.

En los sensores MOS CCD los portadores minoritarios son atraídos y almacenados en las estructuras MOS cercanas al punto de incidencia de la radiación, formando paquetes de carga mediante la aplicación de un potencial en las puertas, lo que limita el espesor del sustrato a ~ 20 m. La extracción de los paquetes de carga se consigue desplazando secuencialmente el potencial aplicado a cada una de las puertas de las estructuras MOS, bajo el control de un reloj polifásico

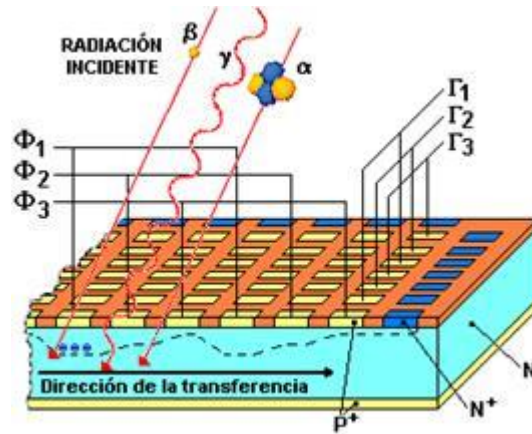


Figura 13. Detalle de una estructura MOS

Recuperado: Sensores de radiación nuclear con semiconductores.

Los sensores p - n CCD fueron desarrollados en los años 90, y a diferencia de los MOS CCD, transfieren paquetes de carga formados con portadores mayoritarios, permiten una mayor velocidad de trabajo, tienen una mejor eficiencia en la transferencia de carga y más sensibilidad.

Su estructura está formada por un sustrato n , cuyo espesor es de ~ 300 mm, en el que se han difundido segmentos de tipo p^+ en su cara superior y una región de tipo p^+ en la cara inferior. Al igual que sucede en los sensores de arrastre, cuando se polarizan inversamente todas las uniones p^+ - n , se forma una zona de transición común y un canal de potencial mínimo. Variando el grado de polarización de las uniones p^+ - n superiores (puertas) respecto de la inferior, mediante la aplicación de un potencial controlado por un reloj polifásico, los portadores mayoritarios generados por la radiación incidente son arrastrados hacia la superficie del sustrato y hacia la unión de salida.

[14]

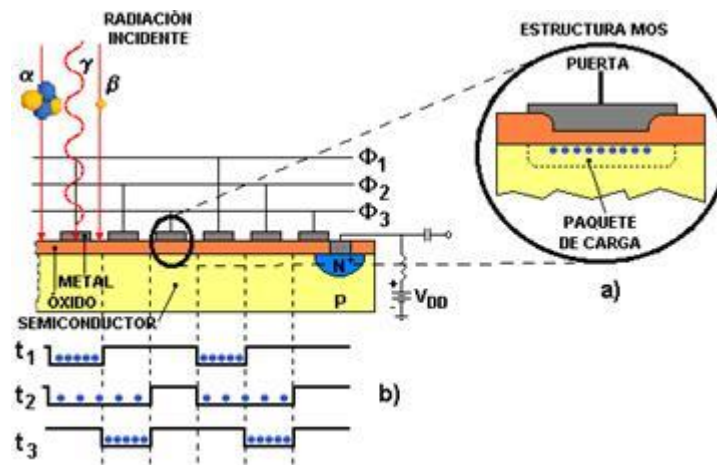


Figura 14. Estructura de un sensor *p-n* CCD 2-D.

Recuperado: Sensores de radiación nuclear con semiconductores.

Los sensores CCD habitualmente son de Si y proporcionan una señal pequeña, por lo que necesitan trabajar a temperaturas inferiores a 300 °K para reducir el ruido. Otro inconveniente que tienen es que hasta que no ha sido extraído un paquete de carga no se puede realizar una nueva lectura, por lo que los inhabilita para aquellas aplicaciones en las que se requieran tiempos inferiores a milisegundos entre medidas. Aún con todo, son sensores con una gran resolución espacial ~ 5 (m) y disponen de una elevada eficiencia cuántica. [14]

5.6 Sensor de Píxel Activo (APS)

Un sensor de píxeles activos (APS) es un sensor de imagen donde cada celda unitaria del sensor de píxeles tiene un fotodetector (típicamente un fotodiodo fijado) y uno o más transistores activos. En un sensor de píxel activo de semiconductor de óxido de metal (MOS), los transistores de efecto de campo MOS (MOSFET) se utilizan como amplificadores. Existen diferentes tipos de APS, incluidos los primeros NMOS APS y el mucho más común APS MOS (CMOS), también conocido como el sensor CMOS, que se usa ampliamente en tecnologías de cámaras digitales como cámaras de teléfonos celulares, cámaras web, las más modernas cámaras digitales de bolsillo, la mayoría de las cámaras réflex digitales de lente única (DSLR) y cámaras de lentes intercambiables sin espejo (MILC) y en la detección de rayos X.

Este sensor cuya característica principal es su alta resolución espacial y su eficiencia en la detección de Rayos X, está formado por una matriz de pixeles, cada uno contiene un fotodiodo y un convertidor analógico-digital.

Los detectores modernos con CMOS generan imágenes con mejor resolución que las producidas por las placas fotográficas. Con esta resolución, se superan las limitaciones que tenían los sistemas digitales y se reemplazan con ventaja los detectores de silicio amorfo utilizados en radiología y fluoroscopia.

Sin importar el método mediante el cual se captura la imagen, una vez digitalizada puede ser manipulada por los conocidos métodos computacionales. Por ejemplo, la imagen puede hacerse más clara u oscura simplemente sumando o restando el mismo número a cada pixel. El contraste puede ser manipulado por medio del gradiente de la escala de grises. La escala de grises podría invertirse, con lo que se logra una imagen en fondo negro.

La señal proveniente del detector digital es fácilmente utilizable en una amplia variedad de rutinas de post-procesamiento, con lo que obtienen mejoras considerables en la calidad de la imagen. [15]

5.7 Detectores MOSFET (Transistor de efecto de campo metal -óxido- semiconductor).

El funcionamiento principal de la dosimetría MOSFET se basa en la generación de pares agujero-electrón en el óxido de la estructura MOSFET (gate oxide) debido a la radiación ionizante. La producción de energía de un par e-h en óxido de silicio es de aproximadamente 18eV. Las cargas positivas se mueven en la dirección de la interfaz Si / SiO₂ donde se capturan en las trampas y, por lo tanto, crean una carga positiva Q_T de acumulación de carga. La hoja de carga positiva formada cambia efectivamente la corriente en el canal y conduce al cambio correspondiente del voltaje de polarización de la puerta ΔV_{th} (es decir, un cambio en el voltaje umbral) para asegurar un flujo de corriente constante dado a través del canal. La corriente en el canal es muy sensible a la carga Q_T ya que se encuentra físicamente muy cerca del canal.

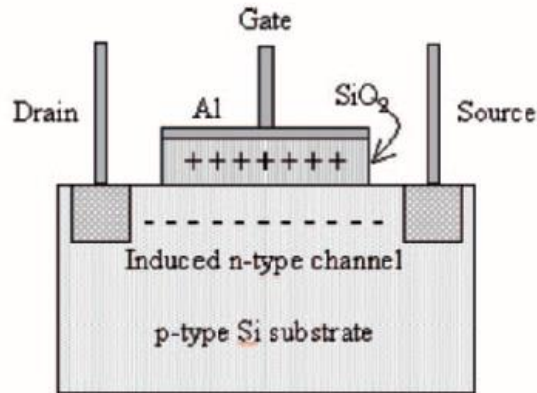


Figura 15. Diagrama esquemático del detector n- MOSFET.

Recuperado: radiation detectors for medical applications

6. ALGUNAS VENTAJAS DE LOS DETECTORES SEMICONDUCTORES

- La energía necesaria para producir un par de portadores de carga en los semiconductores es del orden de 3 eV - 5 eV. Aproximadamente 10 veces menor que en gases y centelladores, la energía correspondiente para los gases en las cámaras de ionización (aproximadamente 30 eV). Para los detectores Ge, Si y GaAs, las energías son 2.8, 3.6 y 4.2 eV, respectivamente. Por lo tanto, el número de pares de electrones y agujeros generados en el detector de semiconductores es mayor y el efecto de las fluctuaciones estadísticas es más débil.[46]
- La densidad del material del detector de semiconductores es sustancialmente mayor que la densidad del gas en las cámaras de ionización. Por lo tanto, incluso los detectores pequeños se pueden usar para detectar partículas nucleares de alta energía y fotones gamma. [18]
- Los materiales semiconductores tienen tamaño compacto, respuesta temporal rápida y un grosor efectivo que se puede variar según la aplicación deseada.
- Alta densidad del medio ionizable (2000 a 5000 veces más densos que los gases.
- Alto poder de frenado que genera una alta eficiencia de detección por unidad de volumen efectivo del detector.
- Para una misma energía, la cantidad de portadores de carga producidos es mucho mayor en los detectores semiconductores que en detectores de gases o centelladores dando como resultado menores fluctuaciones estadísticas y por ende en una mejor resolución en energía.
- Buena señal que permite la detección y conteo de eventos individuales.

- La señal es proporcional a la energía depositada en el medio detector. Pueden usarse para determinar la/s energía/s de la radiación incidente. [21]

Los detectores modernos de semiconductores se emplean ampliamente en espectrometría nuclear para la detección de partículas α , electrones y radiación γ , y en medicina para la detección de radiación de rayos X.

Características generales de los detectores de ionización

Un detector es un instrumento capaz de medir la presencia y posiblemente algunas de las propiedades de la radiación. La sensibilidad es la capacidad de detección, y vale la pena destacar desde el principio que ningún detector es sensible a todos los tipos de radiación y en todos los rangos de energía. Los detectores están optimizados para uno o más tipos de radiación y normalmente en un rango de energía específico.

7. DISEÑO DEL PROTOTIPO ELECTRÓNICO DEL DETECTOR DE RAYOS X

7.1 Diagrama esquemático

Todos los sistemas detectores de semiconductores incluyen las mismas funciones básicas. La señal de cada sensor o canal de sensor en un conjunto de detectores debe amplificarse y procesarse para su almacenamiento y análisis. Por lo general, la recolección de la carga se logra mediante la imposición de un campo eléctrico dentro del detector, lo que hace que las cargas positivas y negativas creadas por la radiación fluyan en direcciones opuestas.

Las funciones básicas del detector se muestran en la figura 16, donde la radiación se absorbe en el sensor y se convierte en una señal eléctrica, esta señal de bajo nivel se integra en un preamplificador, se alimenta a un moldeador de pulso y luego se digitaliza para su posterior almacenamiento y análisis.

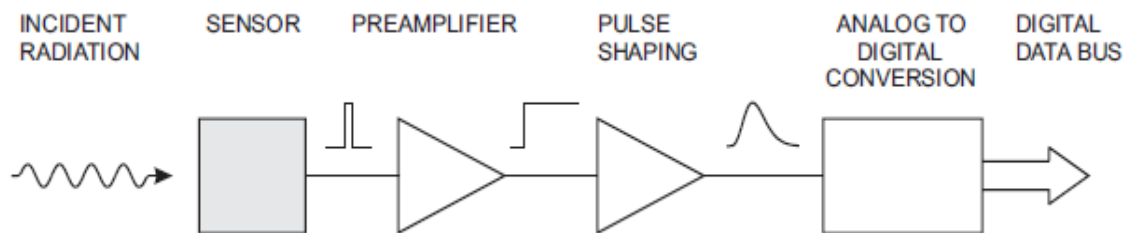


Figura 16. Funciones básicas del detector

Recupera de: (PDF) semiconductor detector system

7.1.1 Sensor

El sensor convierte la energía depositada por una partícula (o fotón) en una señal eléctrica. Esto se puede lograr de varias maneras, pero en este contexto la energía se absorbe en un semiconductor, por ejemplo, el silicio, que produce portadores de carga móviles, pares de electrones y huecos. Un campo eléctrico aplicado al sensor barre los portadores de carga a los electrodos, lo que induce una corriente eléctrica. El número de pares electrón-agujero es proporcional a la energía absorbida, por lo que al integrar la corriente de la señal se obtiene la carga de la señal, que es proporcional a la energía. [24]

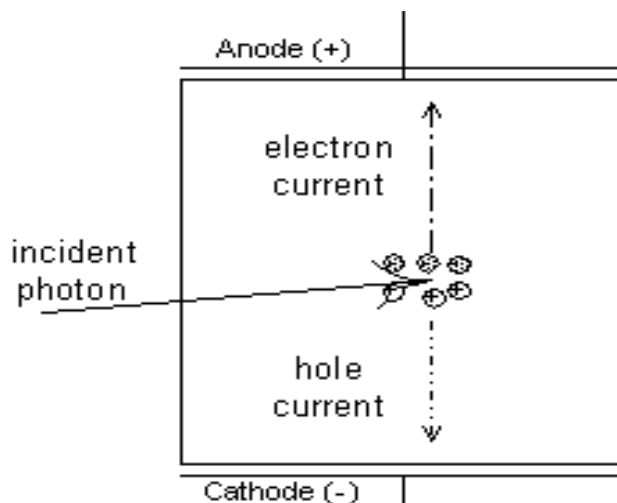


Figura 17. Esquema de un detector semiconductor de radiación.

Recuperado de: <https://www.amptek.com/internal-products/charge-trapping-in-xr-100t-cdte-cadmium-telluride-detectors-application-note>

7.1.2 Preamplificador

El primer elemento en una cadena de procesamiento de señal es a menudo un preamplificador provisto como una interfaz entre el detector y la electrónica de procesamiento y análisis de pulso que sigue. La carga de la señal puede ser bastante pequeña, aproximadamente 5×10^{-17} C para rayos X de 1 keV y 4×10^{-15} C en un detector de seguimiento típico de alta energía, por lo que la señal del sensor debe amplificarse. La magnitud de la señal del sensor está sujeta a fluctuaciones estadísticas, y el ruido electrónico “difumina” aún más la señal. en este punto observamos que el sensor y el preamplificador deben diseñarse cuidadosamente para minimizar el ruido electrónico.

El preamplificador generalmente se encuentra lo más cerca posible del detector. Desde el punto de vista de señal a ruido, siempre es preferible minimizar la carga capacitiva en el preamplificador y, por lo tanto, se deben evitar los cables de interconexión largos entre el detector y el preamplificador si es posible. Una función del preamplificador es terminar la capacitancia rápidamente y, por lo tanto, maximizar la relación señal /ruido. Por conveniencia o consideraciones de seguridad, los componentes que siguen en la cadena de procesamiento de pulso a menudo se encuentran a cierta distancia del detector y preamplificador. Por lo tanto, otro requisito es que la etapa de salida del preamplificador sea capaz de conducir su señal a la gran capacidad representada por el cable de interconexión largo, o que tenga una baja impedancia de salida. [24,25]

Los preamplificadores pueden ser del tipo sensible a la tensión o a la carga. Históricamente, el tipo sensible al voltaje es el más convencional en muchas aplicaciones electrónicas y consiste simplemente en una configuración que proporciona un pulso de salida cuya amplitud es proporcional a la amplitud del pulso de voltaje suministrado a sus terminales de entrada. En la figura 18 se muestra un diagrama esquemático de una configuración sensible al voltaje.

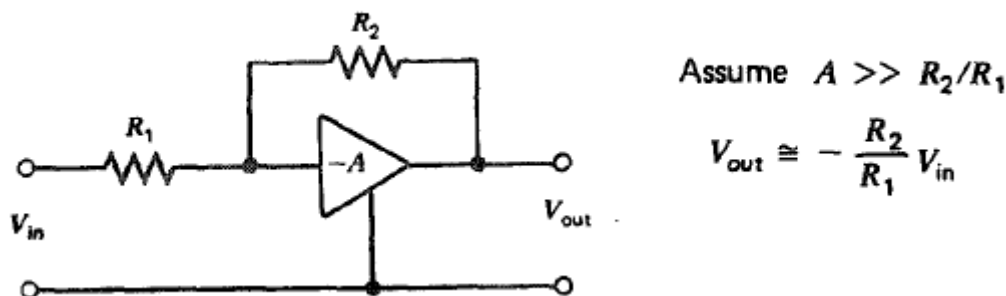


Figura 18. Diagrama esquemático de una configuración simplificada de preamplificador sensible al voltaje.

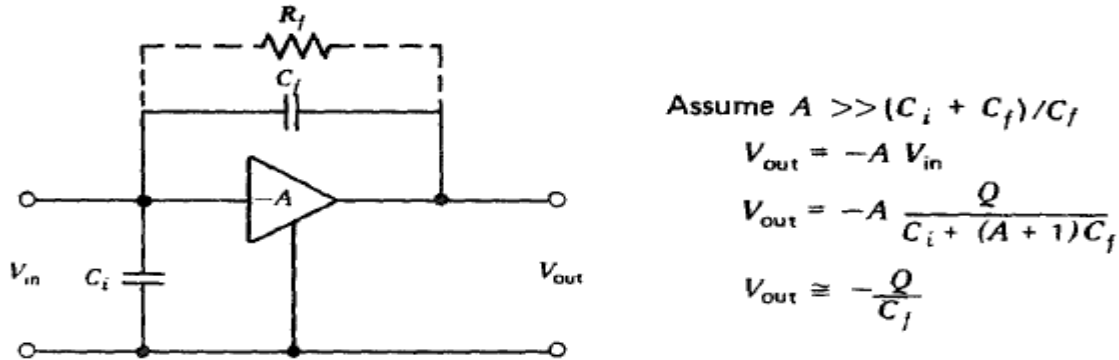


Figura 19. Diagrama esquemático de una configuración simplificada de preamplificador sensible a la carga

Para el circuito de la figura 19 el voltaje de salida es proporcional a la carga integrada total en el pulso proporcionado por a los terminales de entrada, siempre que la duración del pulso de entrada sea corta en comparación con la constante de tiempo $R_f C_f$. Los cambios en la capacitancia de entrada no tienen efecto apreciable en el voltaje de salida.

7.1.3 Moldeador de pulso

En los sistemas detectores de semiconductores, la función principal del modelador de pulso es mejorar la relación señal / ruido. Aunque estamos considerando pulsos de señal, es decir, señales que varían en el tiempo, la potencia de la señal también se distribuye en el espacio de frecuencia, cuantificada por la transformada de Fourier del pulso. Los espectros de frecuencia de la señal y el ruido difieren, por lo que se puede mejorar la relación señal / ruido aplicando un filtro que adapta la respuesta de frecuencia para favorecer la señal, mientras atenúa el ruido.

La figura 20 muestra un preamplificador que está configurado como un integrador, que convierte el pulso de corriente estrecho del sensor en un impulso gradual con un tiempo de caída prolongado. Un filtro de paso alto CR posterior introduce el tiempo de caída deseado y un filtro de paso bajo RC limita el ancho de banda y establece el tiempo de subida.

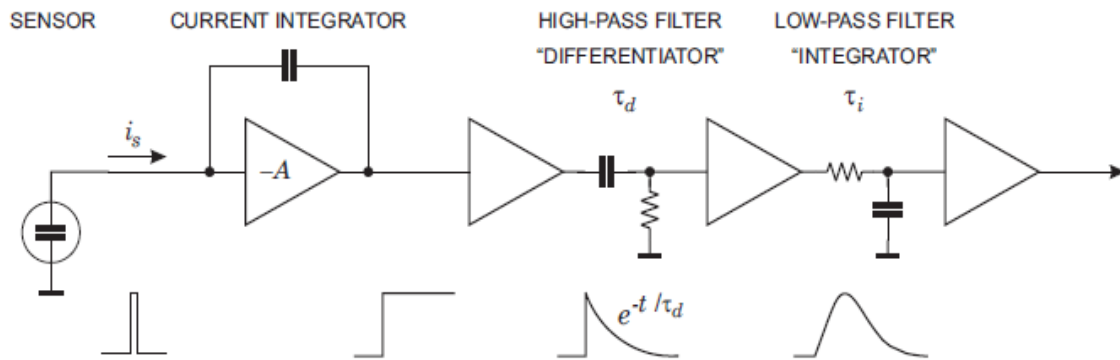


Figura 20. Componentes de un moldeador de pulso

Recuperado de: (PDF) semiconductor detector system

Moldeador basado en inversor

Los filtros con forma de pulso se utilizan para medir la energía de las partículas de carga [52]. El propósito de tales filtros es proporcionar un pulso de voltaje con una altura proporcional a la energía de la partícula detectada. Una técnica bien conocida es utilizar un filtro de paso alto (HPF) condensador-resistencia (CR) y un número (n) de filtros de paso bajo (LPF) resistor-capacitor (RC) para crear un filtro CR-RCn (moldeador semi-gaussiano [SG]) [52]. El HPF establece la duración del pulso al introducir una constante de tiempo de caída y n LPF aumentan el tiempo de subida para limitar el ancho de banda de ruido.

7.1.4 Digitalizador

Desarrollado por primera vez para su uso en la detección de radiación, la conversión de analógico a digital hoy en día es una técnica convencional y hay disponibles ADC con una amplia gama de características. El número de comparadores determina la resolución. Por ejemplo, 256 comparadores pueden proporcionar un rango de escala completa de 1V con una resolución de 3.9mV. En la práctica la disipación de potencia y el tamaño del chip limitan la resolución obtenible. En general, aumentar la velocidad del circuito requiere más potencia, por lo que los ADC intercambian la resolución frente a la velocidad.

Un ADC conceptualmente simple se muestra en la Figura 21. La señal se alimenta en paralelo a un banco de comparadores con umbrales que aumentan monotónicamente, proporcionados por un divisor de voltaje de resistencia. Cuando la altura del pulso excede un cierto umbral, todos los

comparadores con umbrales más bajos se activan y un decodificador traduce el patrón de aciertos a una forma más conveniente (por ejemplo, binaria).

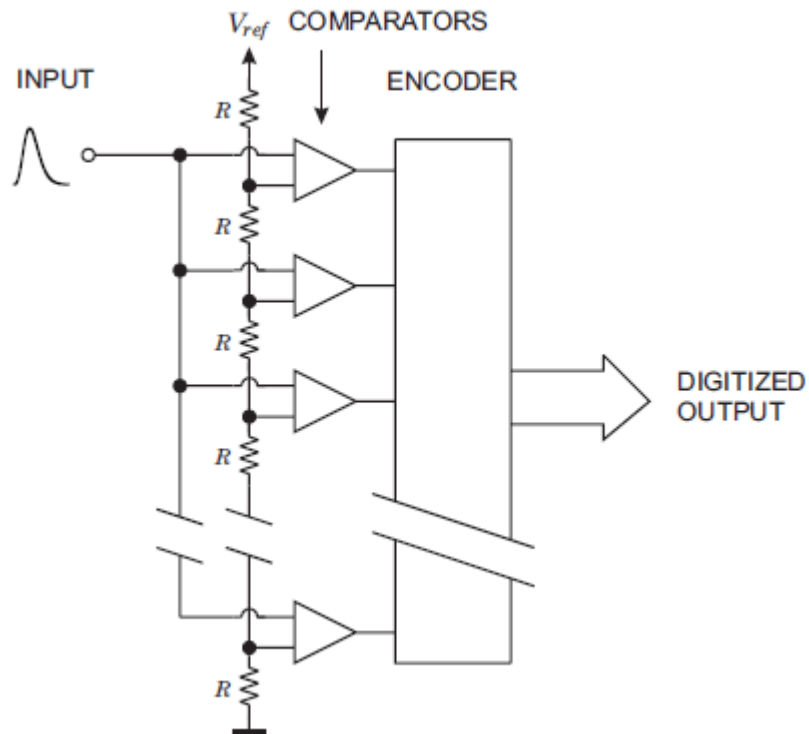


Figura 21. ADC conceptualmente básico.

Recuperado de: (PDF) semiconductor detector system

7.2 Diseño

Para empezar a diseñar primero se debe tener en cuenta lo que se necesita, en lugar de "lo que sería bueno". Muchos diseños fallan debido al "arrastre de características", agregando "mejoras" a mitad de flujo que realmente no son necesarias, pero agregan complejidad o simplemente desorden. A menudo, las ideas parecen inteligentes o elegantes, pero no agregan mucho a la funcionalidad. Los sistemas complejos ofrecen un gran potencial para las sorpresas, por lo que es prudente adoptar técnicas bien entendidas a menos que existan razones válidas para adoptar algo nuevo. Las innovaciones pueden traer ventajas significativas sin aumentar el riesgo, pero tomar esta decisión requiere conocimiento y comprensión técnica.

El diseño del circuito integrado (IC) comúnmente es un área problemática. Por un lado, la disponibilidad de software de diseño "gratuito" y el acceso económico a las ejecuciones de

fabricación multiproyecto permiten que casi cualquier persona diseñe un IC y obtenga algunos chips. Algunos grupos han usado este enfoque de manera muy efectiva, pero muchos han fallado. Diseñar un CI exitoso requiere más que experiencia en diseño de circuitos.[24]

7.2.1 Cables coaxiales

Prácticamente toda la interconexión de componentes en una cadena de señal para pulsos del detector de radiación se lleva a cabo utilizando un cable coaxial blindado. En la figura 22 se muestra un diagrama de una construcción de cable típica. La construcción blindada está diseñada para minimizar la captación de ruido de los campos eléctricos y electromagnéticos dispersos. Para preservar la flexibilidad del cable, el blindaje externo generalmente está hecho de hilos trenzados de alambre de cobre fino. La efectividad contra los campos eléctricos de baja frecuencia está determinada principalmente por la estanqueidad del escudo trenzado. A frecuencias en las que la profundidad de la piel es comparable o menor que el grosor de la hebra trenzada (digamos, mayor que 100 kHz), el blindaje es bastante efectivo, pero lo será menos a frecuencias más bajas. En condiciones extremas, a veces es necesario rodear la trenza con un segundo escudo para excluir completamente los efectos de campos muy fuertes a través de los cuales debe pasar el cable. Los cables coaxiales doblemente blindados están disponibles comercialmente, para más información se recomienda el libro Radiation Detection and Measurement (Glenn F. Knoll) cap 16. Para la mayoría de las aplicaciones de rutina, el cable de blindaje único proporciona un aislamiento completamente satisfactorio de la captación de señal no deseada.[25]

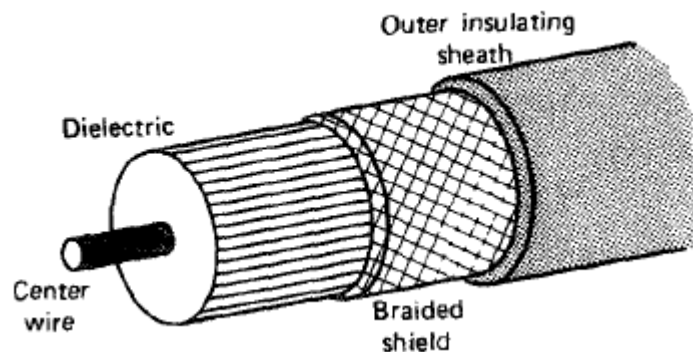


Figura 22. Construcción de un cable coaxial estándar.

Recuperado de: (PDF) Radiation Detection and Measurement

7.3 Elección del detector de semiconductores

Para fabricar un detector de estado sólido, se deben formar al menos dos contactos a través de un material semiconductor. Para la detección, los contactos están conectados a la fuente de voltaje que permite el movimiento del portador. Sin embargo, el uso de un Ge o Si homogéneo es poco práctico. La razón de esto es una corriente de fuga excesivamente alta causada por la resistividad relativamente baja del material ($10^4 \Omega \text{ cm}$ para silicio) por lo que la elección de los materiales ya sea el GaAs o el CZT sería la ideal por su alta resistividad ($10^{10} \Omega \text{ cm}$ y $10^{11} \Omega \text{ cm}$ respectivamente).

El voltaje externo, cuando se aplica a los terminales de dicho detector, puede causar una corriente, que es de 3 a 5 órdenes de magnitud mayor que un minuto de corriente eléctrica inducida por radiación. Por lo tanto, los detectores se fabrican con las uniones de bloqueo, que tienen polarización inversa para reducir drásticamente la corriente de fuga. Si el voltaje de polarización inversa se hace muy grande, por encima del límite especificado por el fabricante, la corriente de fuga inversa aumenta abruptamente (el efecto de ruptura) que a menudo puede conducir a un deterioro catastrófico de las propiedades de detección o la destrucción del dispositivo.[36]

El diodo semiconductor de polarización inversa proporciona un medio que se acerca al ideal para convertir fotones de rayos X en una señal de carga eléctrica, por eso se seleccionó como un posible detector a utilizar en este proyecto.

7.3.1 Diodo PIN

El volumen sensible del detector está formado por un material semiconductor de muy alta resistividad limitado por dos regiones formadas también por semiconductor, en una de ellas los portadores mayoritarios se hacen tipo P agregando impurezas de aceptores de electrones tales como el boro y en la otra parte los portadores mayoritarios son del tipo N al agregar impurezas de otro tipo, como donadores de electrones tales como el fósforo. Un fotodiodo PIN consiste en una región tipo P altamente impurificado P+, una región intrínseca y una región tipo N altamente impurificada N+. [22]

Los diodos PIN se pueden utilizar de dos formas que dependerán de cómo se conecten con el preamplificador:

1. En el que se mide la cantidad de radiación en forma integral, el diodo se usa en modo fotovoltaico, se genera una corriente al interaccionar la radiación con el detector sin que se requiera un voltaje de polarización en el detector. Fig. 23(a). En este caso la respuesta del

detector es el promedio de los eventos que ocurren dentro del mismo. El preamplificador convierte la corriente generada a voltaje.

2. Polarizados inversamente para que se cree una máxima región de ionización por vaciamiento de portadores de la región intrínseca, en este caso el detector responde a cada evento que se realiza dentro del detector. Fig. 23(b). El preamplificador convierte la carga de entrada en voltaje.[22]

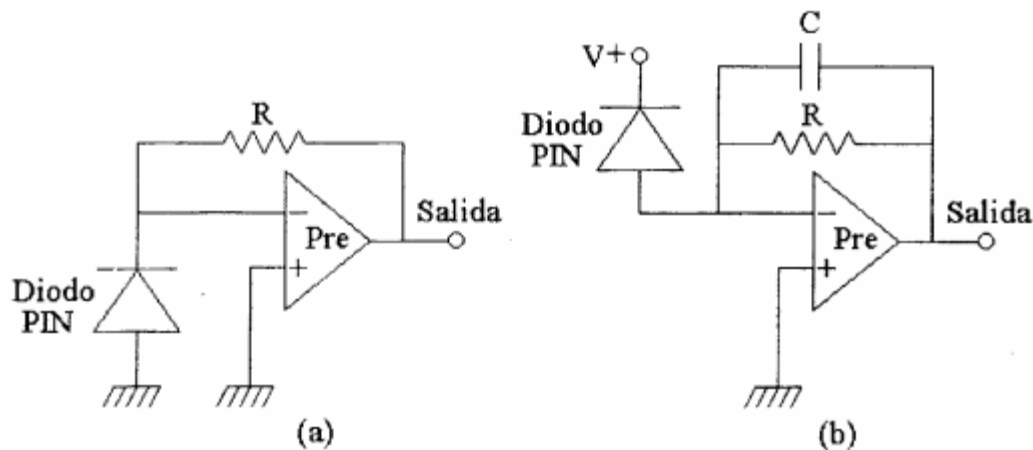


Figura 23. Modos de operación de los diodos PIN.

Recuperado: medición de rayos x con detectores de semiconductor tipo pin.

Para evitar el efecto de la capacitancia de entrada, es deseable desarrollar voltaje de entrada a través de la resistencia y evitar que cargue la capacitancia. Esto se puede lograr empleando un amplificador de corriente a voltaje (I / V) como se muestra en la figura 24. El amplificador y su resistencia de retroalimentación R_L traducen la corriente del diodo en un voltaje de salida amortiguado con la excelente linealidad. Se agrega a la figura un condensador de retroalimentación C_L que proporciona una compensación de fase. Un amplificador ideal mantiene sus dos entradas al mismo voltaje (tierra en la figura), así, la entrada inversora que no está directamente conectada a tierra se llama tierra virtual. El fotodiodo funciona a voltaje cero en sus terminales, lo que mejora la linealidad de la respuesta y evita la carga de la capacitancia del diodo.

Actualmente, los fotodiodos junto con los circuitos electrónicos de interfaz están disponibles en formas integrales y se conocen como convertidores de luz a voltaje. Tal circuito integrado se

compone de un fotodiodo y un convertidor de corriente a voltaje como se muestra en la figura 24. [35]

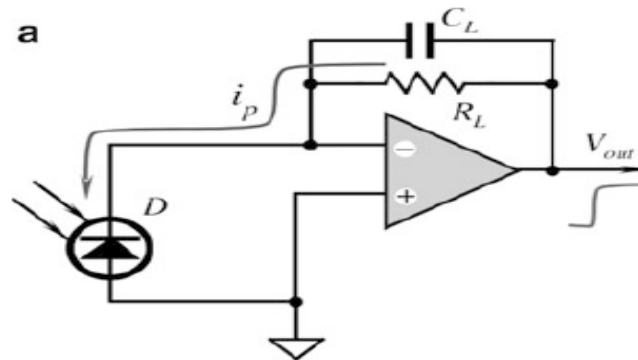


Figura 24. Uso del convertidor de corriente a voltaje

Recuperado de: introduction to radiological physics and radiation dosimetry.

El amplificador y su resistencia de retroalimentación R_L traducen la corriente del diodo en un voltaje de salida amortiguado con la excelente linealidad. Se agrega a la figura un condensador de retroalimentación C_L que proporciona una compensación de fase.

7.4 Electrónica para la función de lectura

7.4.1 Medición de la carga

El problema estándar en la lectura de un detector de semiconductores es la medición de bajo nivel de ruido de la carga de la señal, generalmente bajo restricciones severas como los requisitos de operación de alta velocidad, bajo consumo de energía, espacio restringido y / o altos niveles de radiación.

7.4.2 Amplificador sensible a la carga

El amplificador sensible a la carga (CSA), consiste en un circuito amplificador inversor que, en el caso ideal, entrega un voltaje de salida proporcional a la entrada ($U_{out} = -AU_{in}$) y un condensador de retroalimentación C_f . Además, se necesita una retroalimentación de alta resistencia o un interruptor en el circuito de retroalimentación, para que el circuito entre en su condición de

funcionamiento. C_D representa la carga capacitiva del detector en la entrada, C_i la carga capacitiva a tierra presente en el amplificador, generalmente dominada por la capacitancia de puerta del transistor de entrada.

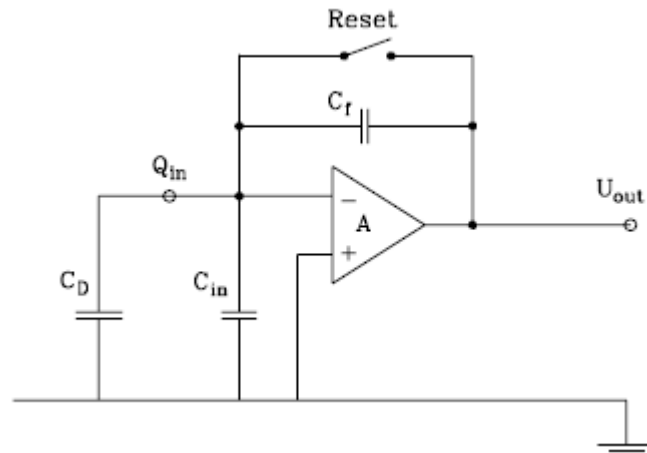


Figura 25. Principio de un amplificador sensible a la carga.

Recuperado de: semiconductor radiation detector.

El amplificador inversor tiene una retroalimentación capacitiva. El interruptor de reinicio solo se usa para poner el sistema en su condición de funcionamiento, y a menudo se reemplaza por una resistencia de alta resistencia.

7.4.3 Ruido en un amplificador sensible a la carga

Otra consideración importante al aplicar un amplificador sensible a la carga para la lectura de un detector se refiere al ruido producido en el sistema amplificador del detector. La contribución del amplificador al ruido se debe al ruido generado por los componentes electrónicos del circuito. Para un amplificador diseñado adecuadamente, su contribución de ruido estará dominada por el ruido generado en los transistores de entrada. Con el transistor en la entrada del circuito, el voltaje de ruido y las fuentes de corriente de ruido se colocan en serie y en paralelo a la entrada. En consecuencia, se habla de ruido "en serie" y "paralelo". [51]

7.4.4 Filtrado y conformación

La señal producida por el amplificador generalmente no se utilizará directamente; se amplificará y moldeará aún más. El objetivo de estos procedimientos es optimizar la relación de señal a ruido

y reducir la interferencia entre señales posteriores. Solo consideraremos algunos casos muy simples, el más simple es un amplificador sensible a la carga idealizada seguido de un filtro RCCR. Para un tratamiento más elaborado, se remite al lector a la literatura (por ejemplo, Gatti y Manfredi 1986).[51]

La disposición de un CSA seguido de un filtro RCCR (figura 26). El modelador realiza una integración RC seguida de una diferenciación CR. Este procedimiento da como resultado un pico de señal.

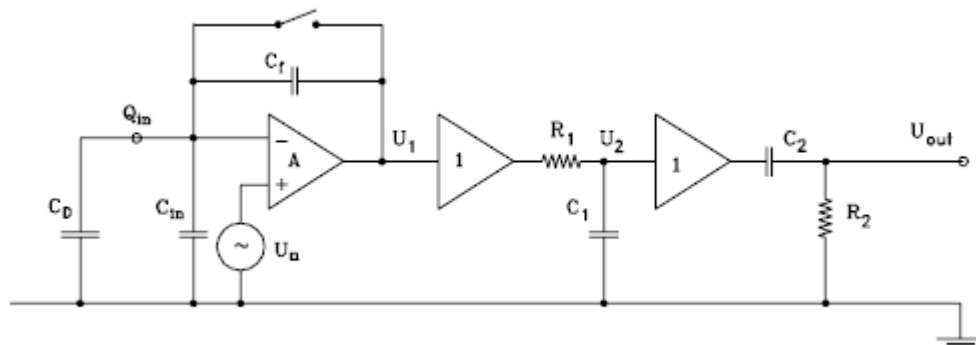


Figura 26. Filtrado de ruido y conformación de señal en un filtro RCCR después de un amplificador sensible a la carga.

Recuperado de: semiconductor radiation detector.

7.5 Ruido

Se hará solamente una breve mención a los ruidos existentes en detectores de rayos X, ya que el estudio del ruido en circuitos es extenso, nos desviaríamos de los objetivos de este proyecto. Lo primero que hay que apreciar es que la electrónica no es "psíquica". Se debe tratar el ruido como cualquier otra carga o excursión de voltaje. La diferencia entre "ruido" y "señal" está solo en la percepción de lo que se quiere estudiar selectivamente. Si se tienen respuestas electrónicas a, digamos, rayos X incidentes, son estas respuestas particulares las que se desean detectar y analizar. Cualquier otra respuesta debido a otros efectos físicos como la temperatura, la vibración, la fluctuación en la llegada de electrones, la captura de carga y las oscilaciones dieléctricas, simplemente se interponen en el camino de las respuestas de rayos X y, como tales, se consideran el "ruido" no deseado. Su importancia radica en que establece un límite inferior en nuestra capacidad para discriminar las "señales" y medirlas con precisión.[37]

7.5.1 Ruido térmico, Johnson o de voltaje

Cuando una corriente fluye en una resistencia, los electrones se dispersan de los átomos que vibran en la resistencia dando una fluctuación en la velocidad de los electrones. Esto también es cierto en un semiconductor (por ejemplo, en el volumen y las superficies del semiconductor y en el canal FET), donde los electrones y los agujeros están dispersos, lo que genera movilidad y una resistencia efectiva. El grado de dispersión depende de la energía kT de los átomos que vibran, de ahí el término ruido "térmico".

Teóricamente, este ruido se entiende muy bien y puede calcularse mediante termodinámica. La razón básica de este ruido son las fluctuaciones térmicas de la distribución de electrones en un conductor. [51]

7.5.2 Ruido dieléctrico

Esta es una derivada del ruido térmico y es atribuible a las fluctuaciones térmicas en el dieléctrico. Cualquier fluctuación en la densidad de carga electrónica debido a la polarización en un dieléctrico establecerá campos que extraerán corriente del circuito externo y aumentarán el ruido del sistema.

7.5.3 Ruido $1/f$

La carga de ruido equivalente (ENC) es independiente de τ , y depende de la relación de las frecuencias de corte superior a inferior en lugar del ancho de banda absoluto. Este tipo de ruido se ve en la mayoría de los dispositivos electrónicos. El espectro de potencia de ruido en la mayoría de los casos tiene una dependencia aproximada de $1/f$.

7.5.4 Microfonía

Esto es inducido por vibraciones externas al circuito y, como tal, no es una fuente de ruido fundamental en el mismo sentido que las anteriores. Sin embargo, en un entorno ruidoso (sentido original de la palabra), puede dominar la resolución del detector. Esto es particularmente cierto para las bajas frecuencias acústicas.

7.5.5 Corriente de fuga

Antes de analizar las contribuciones relativas al ruido en los detectores de rayos X de semiconductores, debemos analizar el origen de la llamada "corriente de fuga". El transductor representado como un condensador en la práctica siempre tiene fugas. En el caso de un diodo de polarización inversa, es una válvula de fuga imperfecta para corriente. Los portadores minoritarios (electrones generados térmicamente en el tipo p y agujeros en las regiones agotadas de tipo n) de la unión p-n serán una fuente de dicha corriente de fuga porque no ven barrera. Los agujeros y los electrones también pueden difundirse desde los bordes de la región de agotamiento donde son barridos por el campo.

7.6 Microcontrolador

La idea de este proyecto es que el detector ya implementado muestre lo que está midiendo en tiempo real en una pantalla LCD, lo más sencillo en este caso es la energía de la radiación, pero también podría mostrar la exposición o las cuentas por minuto solo con unas cuantas variaciones o valores de los circuitos mencionados.

Un microcontrolador es un circuito integrado que en su interior contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida y periféricos. Estas partes están interconectadas dentro del microcontrolador, y en conjunto forman lo que se le conoce como microcomputadora. Se puede decir con toda propiedad que un microcontrolador es una microcomputadora completa encapsulada en un circuito integrado.[57]

La utilización de un microcontrolador en un circuito reduce notablemente el tamaño y el número de componentes utilizados en este y en consecuencia disminuye el número de fallas y el volumen, entre otras ventajas. Un ejemplo de un microcontrolador que se podría utilizar se muestra en la figura 27, ya que cuenta con unos buenos atributos que lo hacen un buen candidato para la realización del detector, para más información se recomienda leer las características de este en la red.

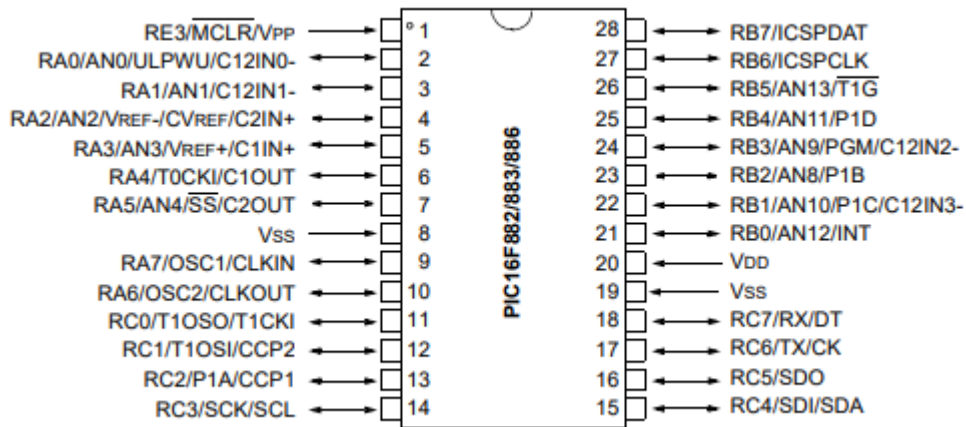


Figura 27. Diagrama de pines del PIC 16F887

Recuperado de: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41291d.pdf>

7.6.1 Conexión del microcontrolador con la pantalla LCD

En la red se encuentran varias maneras de conectar el PIC 16F887 a un LCD, aquí enunciaremos solo dos como ejemplos:

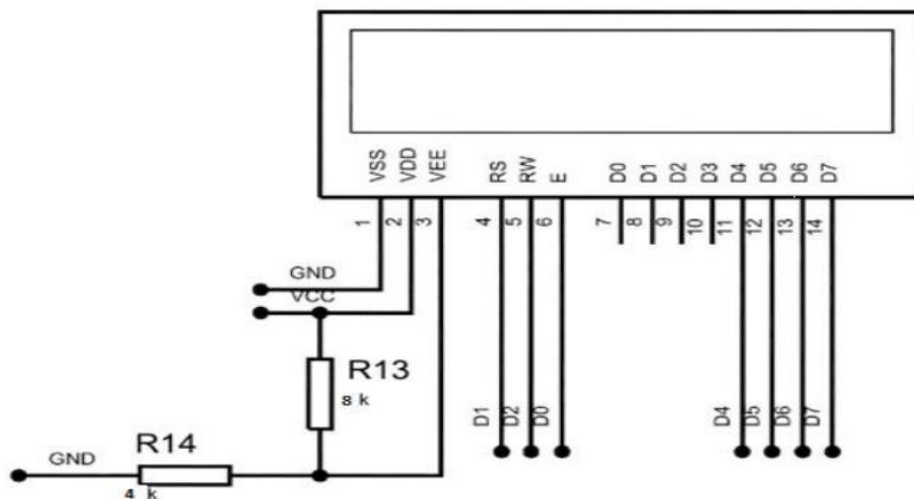


Figura 28. Ejemplo 1: conexión de PIC 16F887 a un LCD

Recuperado de: Diseño e implementación de un sistema de detección y monitoreo de radiación gamma para el ministerio de electricidad y energía renovable.

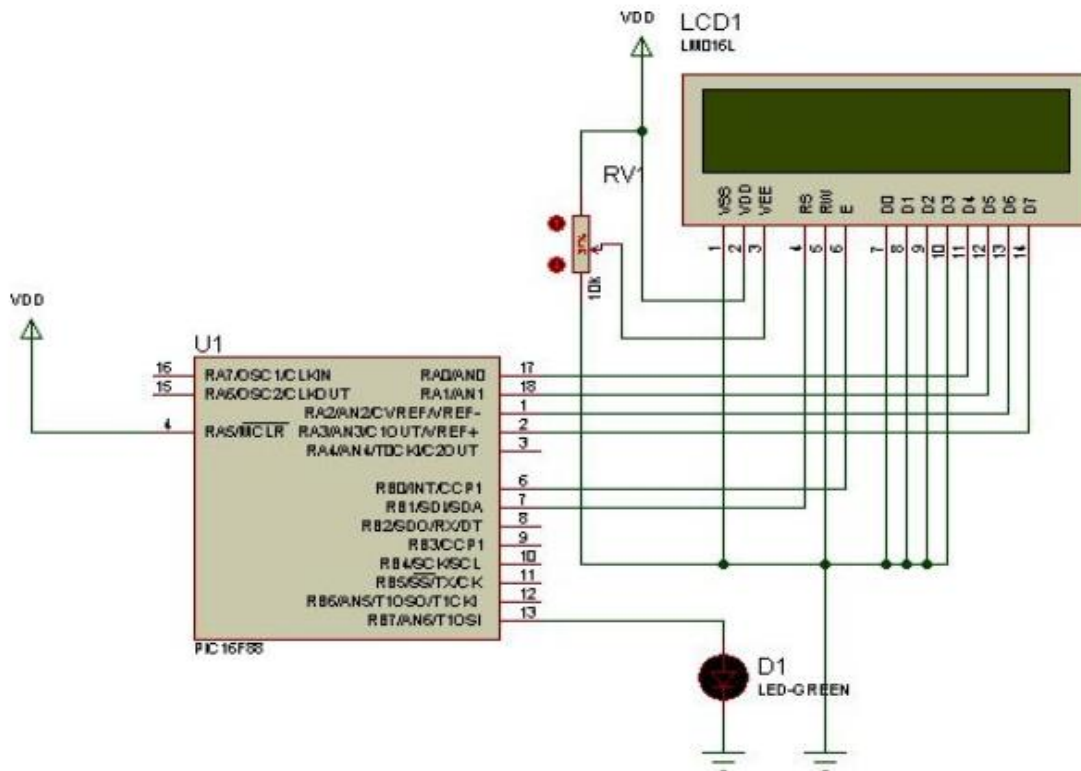


Figura 29. Ejemplo 2: conexión de PIC 16F887 a un LCD

Recuperado de: <https://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-pic/pantalla-lcd-16x2-con-pic-libreria/>

7.7 Fuente de alimentación

Los detectores semiconductores de radiación ionizante operan a grandes voltajes inversos (1000-3000) V, haciendo más eficiente la recogida de la carga y aumentando el volumen de sensibilidad del detector, forzando a las cargas que se desplacen de un tipo de material a otro.

En este prototipo la fuente de alimentación va a ser a través de un puerto USB que entrega 5V, por lo que necesitaremos un multiplicador de voltaje para obtener los 1000V que necesitamos para el detector. Para lograr esto primero se convierte el voltaje continuo a voltaje alterno por medio del oscilador luego se amplifica, multiplica el voltaje y por último se regula para obtener la salida deseada.

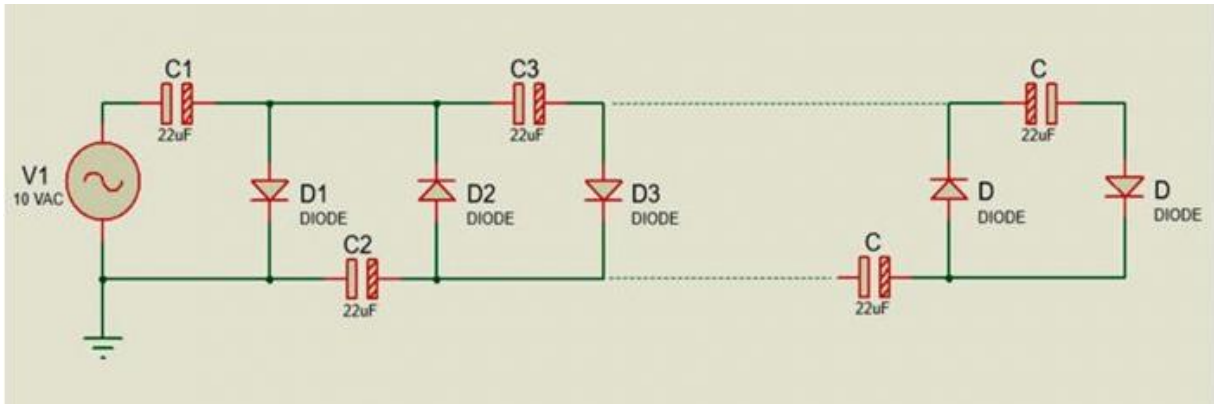


Figura 30. Multiplicador de voltaje simple

Recuperado de: <https://tlectronixs.com/multiplicadores-de-voltaje/>

7.8 Montaje teórico del circuito

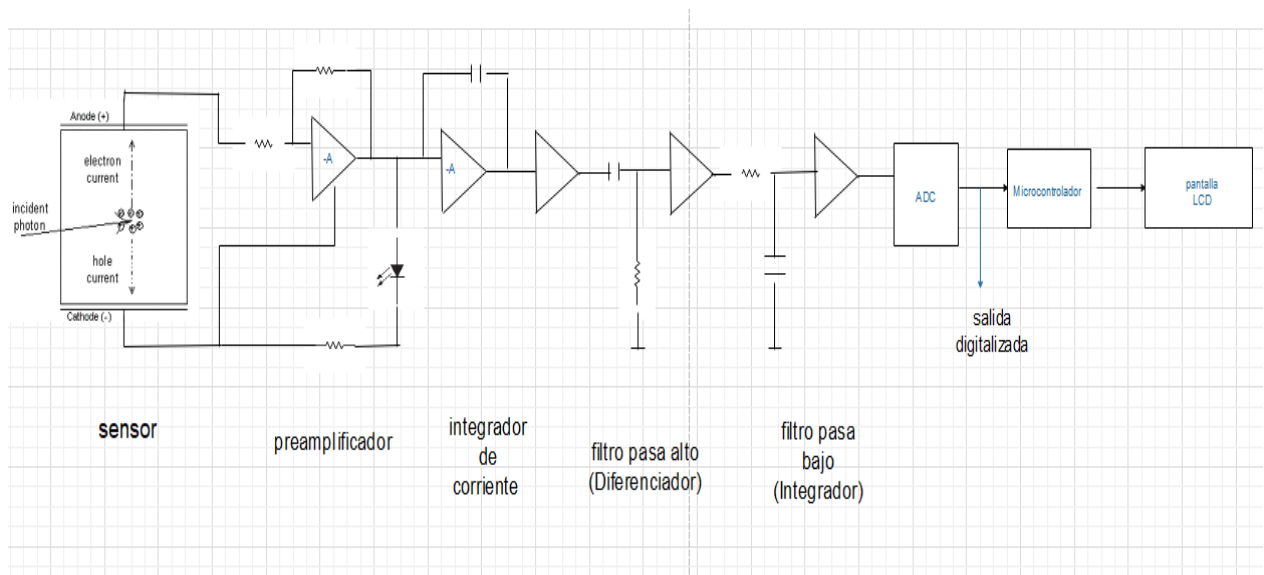


Figura 31. Montaje teórico del circuito

Elaborado por (autores de la investigación)

La función que cumple el led es encenderse cuando el detector esté en funcionamiento, en este caso cuando se le aplique la diferencia de potencial al circuito.

8. DISEÑO DE UN PROTOTIPO MECÁNICO DEL DETECTOR DE RAYOS X

8.1 Materiales y medidas

Escoger los materiales para un detector de radiación es importante, porque la radiación puede ionizar átomos y afectar la estructura cristalina de los semiconductores, dificultando el funcionamiento de los dispositivos electrónicos y en el peor de los escenarios descomponerlos por completo.

Pantalla LCD

Las medidas de la pantalla se muestran en la figura 32, obteniendo (71.2 ± 0.3) mm de largo y (24.5 ± 0.2) mm de ancho, si se desea proteger la pantalla contra la radiación se puede poner una lámina de poliamida o una película adhesiva que tiene una capa metalizada que aplaca la radiación.

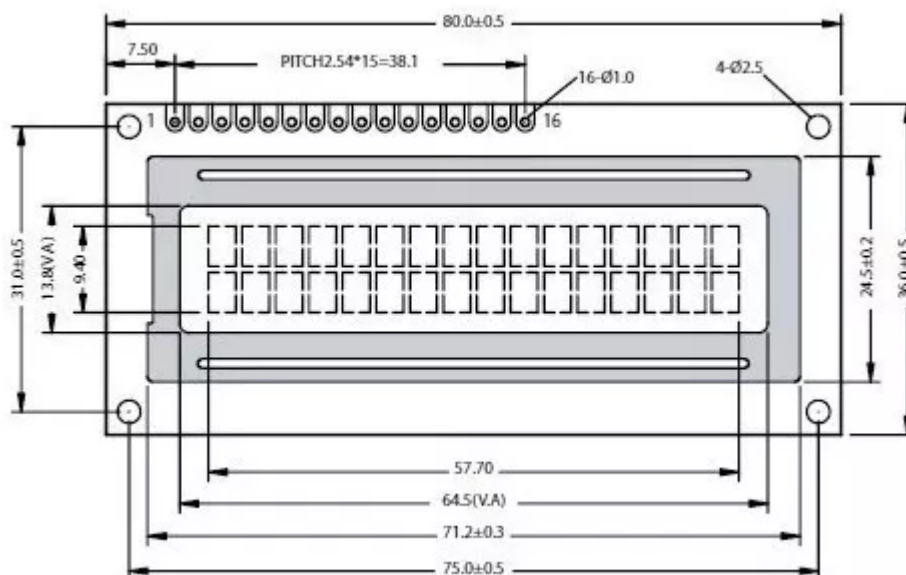


Figura 32. Medidas de una pantalla LCD

Recuperado de: <https://www.electronicoscaldas.com/en/displays-lcd-alfanumericos-y-graficos/286-display-lcd-16x2-lcm1602a.html>

Detector

Kromek es una de las cuatro únicas compañías en el mundo que fabrica telurio de cadmio y zinc CZT (CdZnTe). Fabrican una gama de detectores CZT espectroscópicos monolíticos , que van desde (1 x 1 x 0.5) cm, (2.2 x 2.2 x 0.5) cm, (2.2 x 2.2 x 1.5) cm y (4 x 4 x 1.5) cm. [65]

Para este diseño mecánico escogemos una medida de (2.2 x 2.2 x 0.5) cm, si no se utiliza este detector, sino que se escoge algún otro como por ejemplo los diodos, este tamaño seguiría funcionando bien ya que solo se escoge para poner una ventana de berilio o grafito, con el objetivo de permitir que la radiación pueda incidir sobre el detector, de otra manera la radiación no interactuaría de manera eficiente con el detector.

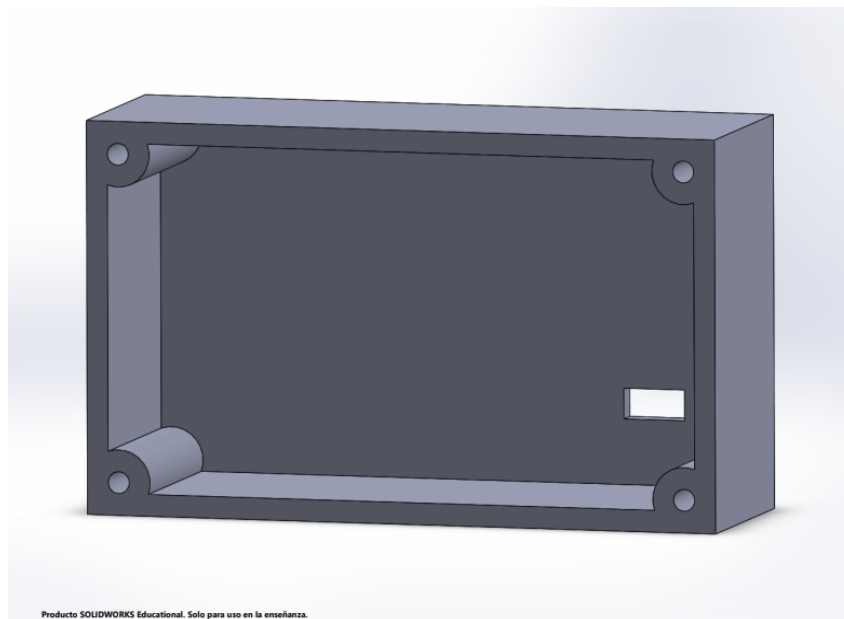
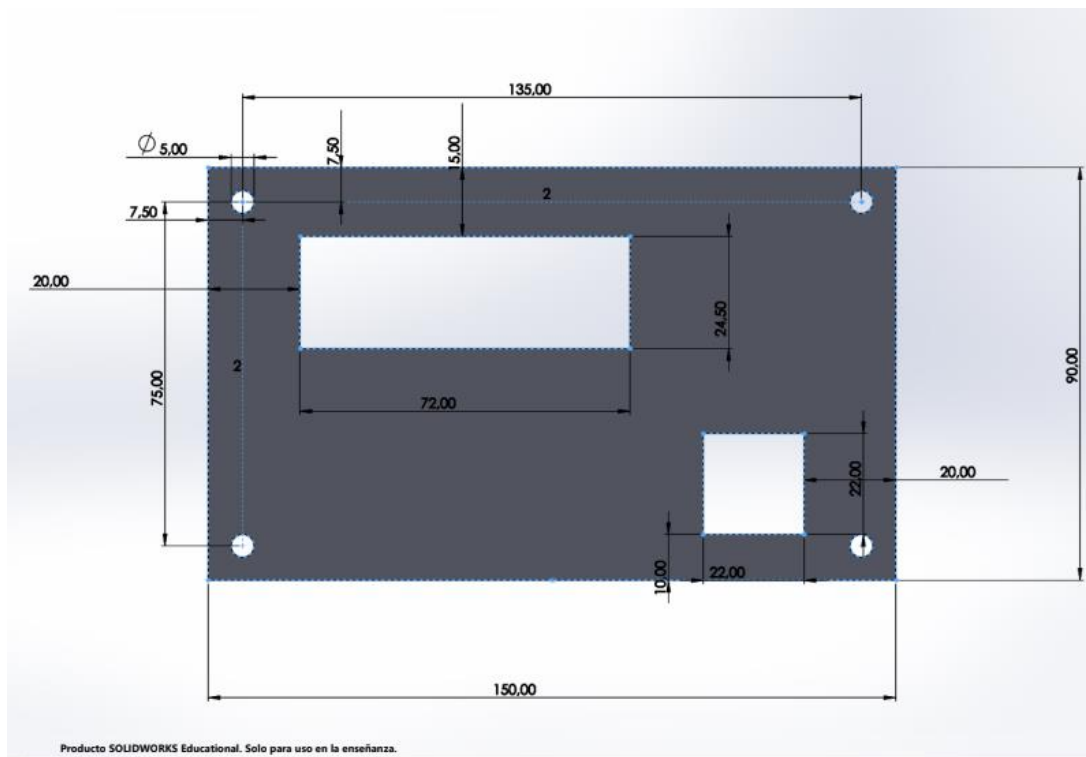
Electrónica

Basándose en la figura 31, y suponiendo que se va a realizar este montaje en una placa electrónica se propone una medida de 12 cm de largo y 8cm de ancho.

Se elige una caja de material metálico, por su alta densidad ($11,34 \text{ kg/dm}^3$), propiedades nucleares, además de tener un bajo costo y de fácil fabricación.

8.2 Diseño mecánico

Para hacer la simulación del diseño mecánico se utilizó el programa Solid Works.



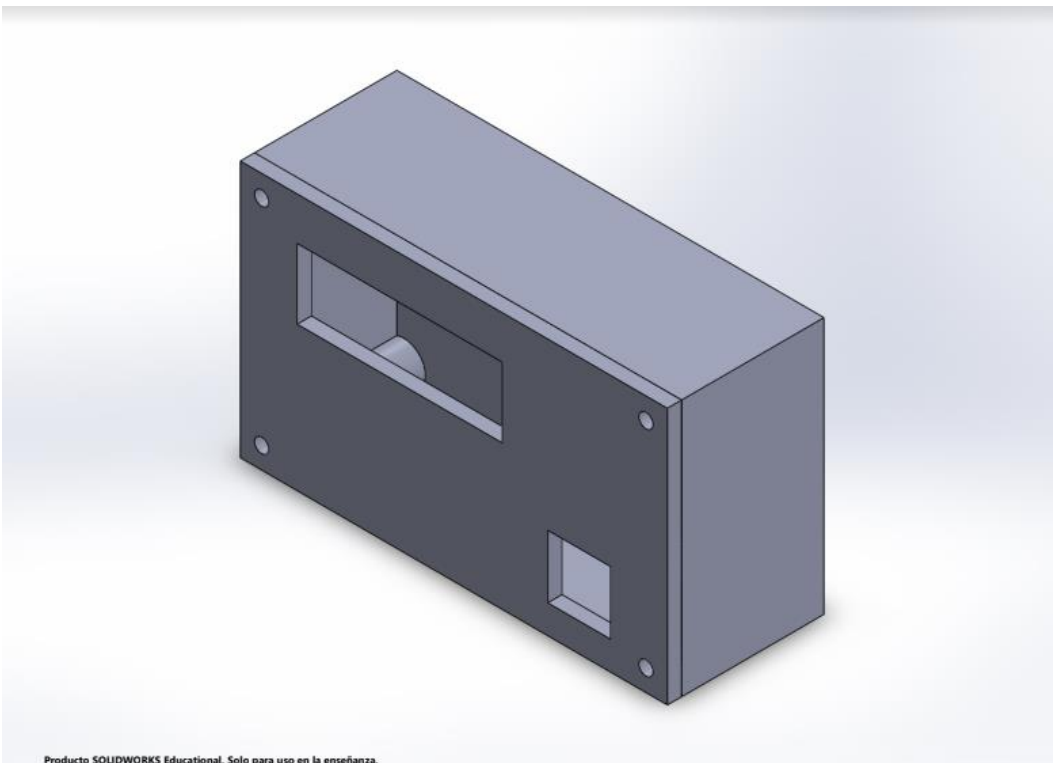
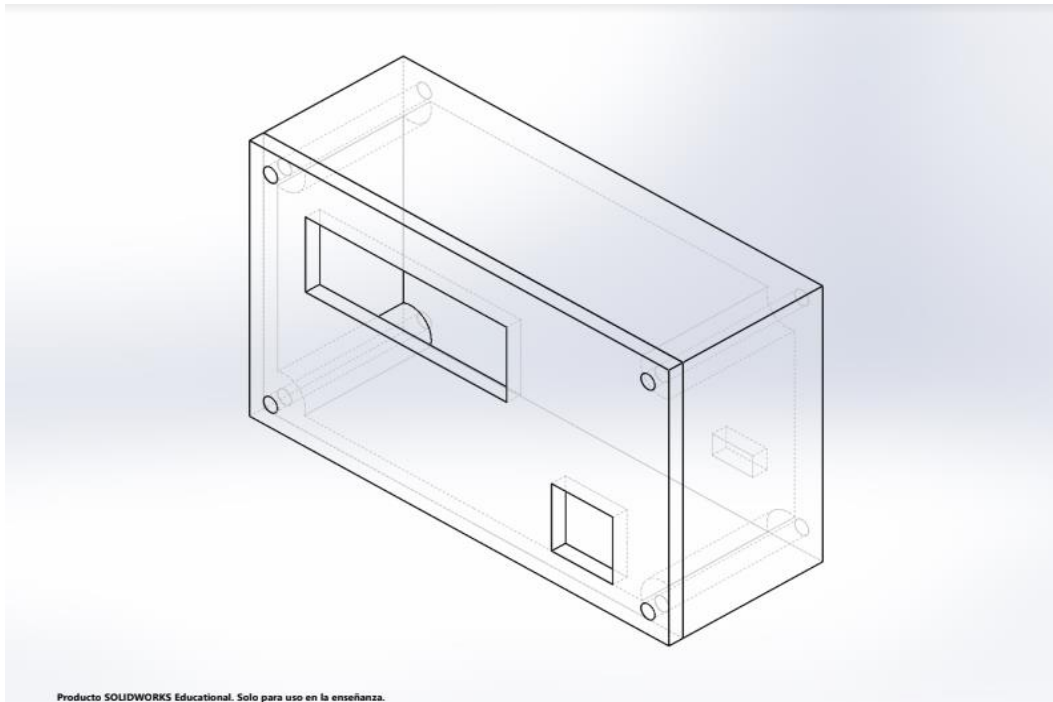


Figura 35. Simulación del detector de rayos X
Elaborado por (autores de la investigación)

9. CONCLUSIONES

Las tecnologías de detección de radiación ionizante están evolucionando rápidamente, parcialmente impulsadas por las tendencias industriales, estimulando los desarrollos tecnológicos. Las nuevas tecnologías entran en uso y desaparecen pasado un tiempo nuevamente, o se convierten en herramientas aceptadas y bien utilizadas en la comunidad.

Elegir una tecnología para un detector implica no solo usar la mejor tecnología disponible, sino también una que pueda vivir durante la vida útil esperada y el periodo operativo del requerimiento.

Durante todo el proyecto se ha logrado estudiar el comportamiento de los rayos X, su origen, su generación, sus usos así como sus riesgos para la salud, así también se investigó las características de los materiales semiconductores teóricos y así lograr en base a sus propiedades físicas llegar al material óptimo para usarse en el detector, se enumeraron diferentes materiales semiconductores ya que la radiación va a incidir sobre el material y dependiendo de la interacción entre la radiación y el material será como se comporte el detector ya que para que por ejemplo un detector de germanio funcione, el germanio tiene que estar en un proceso criogénico ya que si no está a temperaturas bajas, el detector funciona incorrectamente ya que no detecta toda la radiación incidente o detecta más de la que estaría realmente llegando por lo que se hace indispensable el conocimiento de los materiales para llegar a una elección que permita tener un detector funcional. Teniendo en cuenta lo consultado y después hacer un análisis teórico de cada material, se llegó a escoger un material para el semiconductor que, sobre el papel de un resultado confiable, por lo que además de escoger el material semiconductor también se eligió un tipo de sensor de entre los tipos que se investigaron en el proyecto.

Se planteó el diseño electrónico para un medidor básico de radiación ionizante en la banda de los rayos X, pero hay que tener en cuenta que el circuito varía dependiendo de lo que el investigador esté buscando ya que la electrónica cambia dependiendo de las necesidades requeridas.

10. TRABAJOS FUTUROS

Para la parte electrónica se puede hacer mucho más, se puede agregar algún elemento que recoja los datos del detector y de forma inalámbrica procesarlos después en un computador, por ejemplo el chip Xbee cuenta con entradas y salidas digitales y analógicas que se pueden controlar y conectar a sensores para leer sus mediciones en forma remota, este documento presenta las bases necesarias para construir un prototipo que detecte la energía de los rayos X, el siguiente paso sería hacer simulaciones, para encontrar las posibles fallas en el dispositivo, solucionarlas y proceder con la impresión del circuito en una tarjeta electrónica.

El proyecto puede pasar a otros estadios, ya que con lo teorizado en el presente documento se podría pensar en la implementación del prototipo ya que la demanda de detectores de rayos x continuarán aumentando para aplicaciones industriales, médicas, espaciales, de seguridad, etc. por lo que lograr llevar al mercado un producto nacional, compacto y rápido como lo es un detector partir de semiconductores sería un avance tecnológico significativo que sin duda beneficiaría a muchas instituciones y profesionales.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Radiación electromagnética. Consultado el 1 de octubre de 2019.
<https://astrojem.com/radiacionelectromagnetica.html>
- [2] Semiconductores. Consultado el 7 de octubre de 2019.
<https://www.ecured.cu/Semiconductores>
- [3] Semiconductores. Consultado el 7 de octubre de 2019.
<https://conceptodefinicion.de/semiconductor/>
- [4] Radiación ionizante. Consultado el 15 de octubre de 2019.
https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts149.html
- [5] Efectos biológicos de la radiación ionizante. Consultado el 25 de octubre de 2019.
https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/5efectos_biologicos_de_la_radiacin_ionizante.html
- [6] Espectro electromagnético. Consultado el 15 de octubre de 2019.
<https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/tag/longitud-de-onda/>
- [7] Espectro electromagnético. Consultado el 15 de octubre de 2019.
https://www.espectrometria.com/espectro_electromagnetico
- [8] Rayos X. Consultado el 25 de octubre de 2019.
<https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/rayos-x>
- [9] Producción de rayos x. Consultado el 25 de octubre de 2019.
<http://diarium.usal.es/lcal/files/2013/10/Producción-de-los-rayos-X.pdf>

- [10] Producción de rayos x. Consultado el 25 de octubre de 2019.
<https://www.famaf.unc.edu.ar/~pperez1/manuales/cdr/tubos-de-rayos-x.html>
- [11] funcionamiento de los detectores de radiación. Consultado el 02 de noviembre de 2019.
http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/labo/Lab_Detector.html
- [12] eficiencia de un detector. Consultado el 04 de noviembre de 2019.
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_8.htm
- [13] Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas. Consultado el 07 de noviembre de 2019.
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/INTOR/informe-unscear-2016.pdf>
- [14] Sensores de radiación nuclear a partir de semiconductores. Consultado el 11 de enero de 2020. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos101/sensores-radiacion-nuclear-basados-semiconductores/sensores-radiacion-nuclear-basados-semiconductores.shtml>
- [15] Radiodiagnostico y Radioterapia (Alvaro Tucci R). Consultado el 20 de enero de 2020.
- [16] radiation detectors for medical applications (Stefaan Tavernier, Alexander Gektin, Boris Grinvo). Consultado el 21 de enero de 2020.
- [17] compound semiconductor radiation detector (Alan Owens). Consultado el 07 de febrero de 2020.
- [18] Radiation, ionization and detection in nuclear medicine(Tapan K.Gupta) . consultado el 07 de febrero de 2020
- [19] Excess Noise and Deep Levels in GaAs Detectors of Nuclear Particles and Ionizing Radiation (G. P. Zhigal'skii and T. A. Kholomina). Consultado el 10 de febrero de 2020.

[20] Propiedades físicas y cristalinas del $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$). (Ana María Martínez, Myriam Haydee Aguirre, Raúl D Elía, Javier Núñez García, Adriano Geraci, Alfredo Tolley, Eduardo Heredia, Alicia Beatriz Trigubó). Consultado el 12 de febrero de 2020.

[21] radiactividad y medio ambiente (Leonardo Errico, Lisandro Giovanetti). Consultado el 12 de febrero de 2020.

[22] Prototipo Para la Medición de Parámetros en una unidad de Mamografía utilizando Fotodiodos (Israel Mercado, Fco. Javier Ramírez, Víctor Tovar, Arturo Becerril). Consultado el 14 de febrero de 2020.

[23] MEDICIÓN DE RAYOS X CON DETECTORES DE SEMICONDUCTOR TIPO PIN (Fco. Javier Ramírez Jiménez). Consultado el 14 de febrero de 2020.

[24] (PDF) semiconductor detector system (Helmuth Spieler). Consultado el 16 de febrero de 2020.

[25] (PDF) Radiation Detection and Measurement, third edition (Glenn F. Knoll). consultado el 16 de febrero de 2020.

[26] Radiation, ionization and detection in nuclear medicine (Tapan K. Gupta) . consultado el 16 de febrero de 2020

[27] Radiation and detectors (Lucio Cerrito). Consultado el 16 de febrero de 2020.

[28] Radiation effects in semiconductors and semiconductors devices (V. S. Vavilov and N. A. Ukhin), Translated from Russian and printed by FREUND PUBLISHING HOUSE LTD. consultado el 17 de febrero de 2020.

[29] (PDF) Assessment of a new ZnO:Al contact to CdZnTe for X- and gamma-ray detector applications. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/319996615_Assessment_of_a_new_ZnOAl_contact_to_CdZnTe_for_X-_and_gamma-ray_detector_applications. consultado el 14 de febrero de 2020.

[30] Capabilities of CdZnTe-based Schottky diodes for detection of optical and X/ γ -ray radiation. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/227716691_Capabilities_of_CdZnTe-based_Schottky_diodes_for_detection_of_optical_and_Xg-ray_radiation. consultado el 14 de febrero de 2020.

[31] Using a pulsed laser beam to investigate the feasibility of sub-pixel position resolution with time correlated transient signals in 3D pixelated CdZnTe detector. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/316313783_Using_a_pulsed_laser_beam_to_investigate_the_feasibility_of_sub-pixel_position_resolution_with_time-correlated_transient_signals_in_3D_pixelated_CdZnTe_detectors. consultado el 15 de febrero de 2020.

[32] Micro-inhomogeneities in Semi-insulating CdZnTe. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/319474808_Micro-inhomogeneities_in_Semi-insulating_CdZnTe. consultado el 15 de febrero de 2020.

[33] Assessment of a new ZnO:Al contact to CdZnTe for X- and gamma-ray detector applications. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/319996615_Assessment_of_a_new_ZnOAl_contact_to_CdZnTe_for_X-_and_gamma-ray_detector_applications. consultado el 15 de febrero de 2020.

[34] Improvement of the CdTe Diode Detectors using a Guard-ring Electrode. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/3138813_Improvement_of_the_CdTe_diode_detectors_using_a_guard-ring_electrode. consultado el 15 de febrero de 2020.

[35] (PDF) INTRODUCTION TO RADIOLOGICAL PHYSICS AND RADIATION DOSIMETRY (Frank Herbert Attix). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[36] Handbook of Modern Sensors (Jacob Fraden), fifth edition. Consultado el 17 de febrero de 2020.

[37] Semiconductor X-Ray Detectors (B.G. Lowe, R.A. Sareen). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[38] HARDENING SEMICONDUCTOR COMPONENTS AGAINST RADIATION AND TEMPERATURE (William R. Dawes, Jr. F. Barry McLean Paul A. Robinson, Jr. John J. Silver). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[39] Methylammonium lead tribromide semiconductors: Ionizing radiation detection and electronic properties. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900219302487?via%3Dihub>. Consultado el 17 de febrero de 2020.

[40] Doping Silicon with Lanthanides as a Method for the Optimization of Parameters of Ionizing-Radiation Detectors (N. P. Afanas'eva, D. I. Brinkevich, V. S. Prosolovich, and Yu. N. Yankovskii). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[41] Development of Ionizing Radiation Detectors Based on Synthetic Diamond Material for the Nuclear Power Industry (V. N. Amosov, E. A. Azizov, V. D. Blank, N. M. Gvozdeva, N. V. Kornilov, A. V. Krasilnikov, M. S. Kuznetsov, S. A. Meshchaninov, S. A. Nosukhin, N. B. Rodionov, and S. A. Terent'ev). Consultado el 15 de febrero de 2020.

[42] Excess Noise and Deep Levels in GaAs Detectors of Nuclear Particles and Ionizing Radiation (G. P. Zhigal'skii and T. A. Kholomina). Consultado el 15 de febrero de 2020.

[43] Charge Transfer in the Presence of a Layer of Trapping Centers in Semiconductor SiC Ionizing Radiation Detectors (A. M. Ivanov, E. V. Kalinina, and N. B. Strokan). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[44] A Device for Thermal Treatment of Luminescence Ionizing-Radiation Detectors Intended for Radiation Nondestructive Testing (E. V. Moiseykin, S. V. Nikiforov, Yu. G. Ust'yantsev, K. O. Khokhlov , and K. A. Polyakov). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[45] Position-Sensitive Spectrometric Module for Detecting Ionizing Radiation by Semiconductor Strip Detectors (Yu. V. Tubol'tsev, A. A. Bogdanov, I. V. Eremin, V. K. Eremin, Yu. V. Chichagov, A. S. Fomichev, and N. N. Aruev). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[46] Excess Noise and Deep Levels in GaAs Detectors of Nuclear Particles and Ionizing Radiation (G. P. Zhigal'skii and T. A. Kholomina). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[47] Behavior of Graded-Gap Detectors of Ionizing Radiation under Irradiation with Alpha Particles (L. Dapkus, K. Po ela, J. Po ela, A. il nas, V. Jucien , and V. Jasutis). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[48] QUANTUM-SENSITIVE IONIZING RADIATION DETECTORS COMPENSATED BY GALLIUM ARSENIDE (O. P. Tolbanov). Consultado el 14 de febrero de 2020.

[49] (PDF) reference work entry_ Ionizing Radiation Detectors (Wm. David Kulp III). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[50] Elementary Particles (R. Battiston, T. Behnke, J. Blümer, J. Engler, D. Froidevaux, H. Hillemann, G. Kramberger, J.-M. Le Goff, P. Lecoq, K. Pretzel, and C. Spiering). Consultado el 12 de febrero de 2020.

[51] (PDF) Semiconductor Radiation Detectors (Edited by Salim Reza). Consultado el 13 de febrero de 2020.

[52] Detector pulse shaping for high resolution spectroscopy (M. Konrad). Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4324864>. Consultado el 13 de febrero de 2020.

[53] Alcaraz M. “Detección de radiación ionizante”. Consultado el 12 de febrero de 2020.

[54] “Desarrollo de un detector de rayos X usando fotodiodos”, (Gonzales J., Azorin J.C., Sosa M.A., Cerón P) Consultado el 17 de febrero de 2020.

[55] “Medición de rayos X con detectores de semiconductor tipo PIN”, (Ramirez F.J). Consultado el 17 de febrero de 2020.

[56] “Prototipo para la medición de parámetros en una unidad de mamografía utilizando fotodiodos”(Ramirez F.J.), Consultado el 17 de febrero de 2020.

[57] ¿Qué es un microcontrolador?. Consultado el 19 de febrero de 2020.
<https://www.electronicaestudio.com/que-es-un-microcontrolador/>

[58] tecnología de detector de partículas de silicio resistentes a la radiación (María Celeste Fleta Corral). Consultado el 19 de febrero de 2020.

[59] EVALUACIÓN DE SEMICONDUCTORES COMO DETECTORES DE RADIACIÓN PARA PET. DETECTORES DE CZT (María Pinto Monedero). Consultado el 19 de febrero de 2020.

[60] Recent Progress in CdTe and CdZnTe Detectors (Tadayuki Takahashi and Shin Watanabe). Consultado el 19 de febrero de 2020.

[61] Caracterización de detectores semiconductores de radiación ionizante (Fernando Vitorero Udías). Consultado el 19 de febrero de 2020.

[62] DETECCION DE RADIACION IONIZANTE (Miguel Alcaraz Baños). Consultado el 19 de febrero de 2020.

[63] Introducción a los Detectores (Basado en la exposición de Johanna Morales, Adaptado por Martín Pérez Comisso). Consultado el 19 de febrero de 2020.

[64] Daños provocados por las radiaciones en los sólidos y en los materiales para reactores (Simposio físicos teóricos). Consultado el 19 de febrero de 2020.

[65] About CZT: cadmium zinc telluride. Disponible en:
<https://www.kromek.com/cadmium-zinc-telluride-czt/>. Consultado el 20 de febrero de 2020.